

10/070684

PCT/JP00/06131 #2

日本国特許庁

PATENT OFFICE
JAPANESE GOVERNMENT

08.09.00

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されて
いる事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed
with this Office.

出願年月日
Date of Application:

1999年 9月10日

REC'D 27 OCT 2000

出願番号
Application Number:

平成11年特許願第258133号

WIPO PCT

出願人
Applicant(s):

株式会社ニコン

4

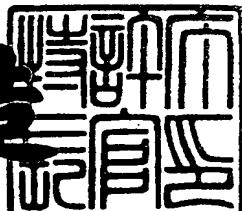
PRIORITY
DOCUMENT

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

2000年10月13日

特許庁長官
Commissioner,
Patent Office

及川耕造



出証番号 出証特2000-3083199

【書類名】 特許願
【整理番号】 99-00837
【提出日】 平成11年 9月10日
【あて先】 特許庁長官殿
【国際特許分類】 H01L 21/027
【発明者】
【住所又は居所】 東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン
内
【氏名】 大槻 朋子
【特許出願人】
【識別番号】 000004112
【氏名又は名称】 株式会社ニコン
【代表者】 吉田 庄一郎
【代理人】
【識別番号】 100098165
【弁理士】
【氏名又は名称】 大森 聰
【電話番号】 044-900-8346
【手数料の表示】
【予納台帳番号】 019840
【納付金額】 21,000円
【提出物件の目録】
【物件名】 明細書 1
【物件名】 図面 1
【物件名】 要約書 1
【包括委任状番号】 9115388
【ブルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 レーザ装置、露光方法及び装置、並びにデバイスの製造方法

【特許請求の範囲】

【請求項1】 紫外光を発生するレーザ装置であって、

赤外域から可視域までの波長範囲内で单一波長のレーザ光を発生するレーザ光発生部と、

該レーザ光発生部から発生されたレーザ光を増幅する光ファイバー増幅器を有する光増幅部と、

該光増幅部によって増幅されたレーザ光を波長変換する複数の非線形光学結晶と、波長変換時の位相整合角の調整を行うために前記複数の非線形光学結晶のそれぞれの温度制御を行う複数の温度制御装置とを有する波長変換部とを備え、前記波長変換部から紫外光を発生することを特徴とするレーザ装置。

【請求項2】 紫外光を発生するレーザ装置であって、

赤外域から可視域までの波長範囲内で单一波長のレーザ光を発生するレーザ光発生部と、

該レーザ光発生部から発生されたレーザ光を増幅する光ファイバー増幅器を有する光増幅部と、

該光増幅部によって増幅されたレーザ光を複数個の非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換する波長変換部と

を備え、前記複数個の非線形光学結晶の少なくとも一つに四ほう酸リチウム ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) の結晶を使用することを特徴とするレーザ装置。

【請求項3】 前記波長変換部は、前記レーザ光の基本波及び7倍波から和周波発生による8倍波を紫外光として発生し、

前記8倍波を発生する部分に四ほう酸リチウム ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) の結晶が使用されることを特徴とする請求項2記載のレーザ装置。

【請求項4】 紫外光を発生するレーザ装置であって、

赤外域から可視域までの波長範囲内で单一波長のレーザ光を発生するレーザ光発生部と、

該レーザ光発生部から発生されたレーザ光を増幅する光ファイバー増幅器を有

する光増幅部と、

該光増幅部によって増幅されたレーザ光を複数個の非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換する波長変換部と
を備え、前記複数個の非線形光学結晶の少なくとも一つにKAB ($K_2 Al_2 B_4 O_7$) の結晶を使用することを特徴とするレーザ装置。

【請求項5】 前記波長変換部は、前記レーザ光の基本波及び7倍波から和周波発生による8倍波を紫外光として発生し、

前記8倍波を発生する部分にKABの結晶が使用されることを特徴とする請求項4記載のレーザ装置。

【請求項6】 前記波長変換部は、前記レーザ光の4倍波から二次高調波発生による8倍波を紫外光として発生し、

前記8倍波を発生する部分にKABの結晶が使用されることを特徴とする請求項4記載のレーザ装置。

【請求項7】 紫外光を発生するレーザ装置であって、

赤外域から可視域までの波長範囲内で单一波長のレーザ光を発生するレーザ光発生部と、

該レーザ光発生部から発生されたレーザ光を増幅する光ファイバー増幅器を有する光増幅部と、

該光増幅部によって増幅されたレーザ光を複数個の非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換する波長変換部と
を備え、前記複数個の非線形光学結晶の少なくとも一つにGdYCOB ($Gd_x Y_{1-x} Ca_4 O (BO_3)_3$) の結晶を使用することを特徴とするレーザ装置。

【請求項8】 前記波長変換部は、前記レーザ光の2倍波から4倍波を発生する部分を備え、

前記4倍波を発生する部分にGdYCOBの結晶が使用され、かつ該GdYCOBの結晶は4倍波の発生を非臨界位相整合で行うことを特徴とする請求項7記載のレーザ装置。

【請求項9】 紫外光を発生するレーザ装置であって、

赤外域から可視域までの波長範囲内で单一波長のレーザ光を発生するレーザ光

発生部と、

該レーザ光発生部から発生されたレーザ光を増幅する光ファイバー増幅器を有する光増幅部と、

該光増幅部によって増幅されたレーザ光を複数個の非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換すると共に、前記複数個の非線形光学結晶の間でレーザ光をリレーする複数個のリレー光学系を備えた波長変換部と
を備え、

前記複数個のリレー光学系中をそれぞれ1つの波長の光が通過する配置としたことを特徴とするレーザ装置。

【請求項10】 前記波長変換部は、基本波の7倍波と前記基本波とから8倍波を生成すると共に、

前記7倍波を生成する際に、基本波、2倍波、5倍波、及び6倍波中の2つの光の和周波発生を用いることを特徴とする請求項9記載のレーザ装置。

【請求項11】 前記レーザ光発生部から発生するレーザ光を複数に分岐する光分岐手段を更に備え、

前記光増幅部は前記複数に分岐されたレーザ光のそれぞれに独立に設けられると共に、

前記波長変換部は、前記複数の光増幅部から出力されたレーザ光の束をまとめて波長変換することを特徴とする請求項1～10の何れか一項記載のレーザ装置。

【請求項12】 紫外光を発生するレーザ装置であって、

赤外域から可視域までの波長範囲内で单一波長のレーザ光を発生するレーザ光発生部と、

該レーザ光発生部から発生されたレーザ光を複数の光束に分岐する光分岐部と

該光分岐部で分岐された複数の光束のそれぞれを光ファイバー増幅器を用いて増幅する複数の光増幅部と、

該複数の光増幅部からの複数の光束を束ねたレーザ光を複数個の非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換する波長変換部と

を備え、前記波長変換部は、前記レーザ光の基本波又は高調波よりなる第1ビーム、及び前記レーザ光の高調波よりなる第2ビームの和周波発生によって高調波を発生する非線形光学結晶と、

前記第1ビームを構成する複数の光束のそれぞれと、前記第2ビームを構成する複数の光束のそれぞれとの大きさを整合させるために交差する2方向で倍率の異なる非等方的光学系とを有することを特徴とするレーザ装置。

【請求項13】 前記非等方的光学系は、前記レーザ光を構成する複数の光束と同じ数のレンズエレメントを有するシリンドリカルレンズのアレイ、又はプリズムのアレイであることを特徴とする請求項12記載のレーザ装置。

【請求項14】 前記レーザ光発生部は、波長が1.5μm付近の单一波長のレーザ光を発生し、

前記波長変換部は、前記光增幅部から出力される前記波長1.5μm付近の基本波を、8倍高調波又は10倍高調波の紫外光に変換して出力することを特徴とする請求項1～13の何れか一項記載のレーザ装置。

【請求項15】 前記レーザ光発生部は、波長が1.1μm付近の单一波長のレーザ光を発生し、

前記波長変換部は、前記光增幅部から出力される前記波長1.1μm付近の基本波を、7倍高調波の紫外光に変換して出力することを特徴とする請求項1～13の何れか一項記載のレーザ装置。

【請求項16】 請求項1～15の何れか一項記載のレーザ装置からの紫外光を使用する露光方法であって、

前記紫外光をマスクに照射し、該マスクのパターンを通過した紫外光で基板を露光することを特徴とする露光方法。

【請求項15】 請求項1～15の何れか一項記載のレーザ装置と、
該レーザ装置からの紫外光をマスクに照射する照明系と、
前記マスクのパターンの像を基板上に投影する投影光学系と
を有し、前記マスクのパターンを通過した前記紫外光で前記基板を露光すること
を特徴とする露光装置。

【請求項16】 請求項16記載の露光方法を用いてマスクのパターンを基

板上に転写する工程を含むデバイスの製造方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、紫外光を発生するレーザ装置に関し、特に半導体素子、撮像素子（CCDなど）、液晶表示素子、プラズマディスプレイ素子、及び薄膜磁気ヘッドなどのマイクロデバイスを製造するためのフォトリソグラフィ工程で使用される露光装置の露光光源や計測用光源に使用して好適なものである。

【0002】

【従来の技術】

例えば半導体集積回路を製造するためのフォトリソグラフィ工程で使用される露光装置は、マスクとしてのレチクル（フォトマスク）上に精密に描かれた回路パターンを、基板としてのフォトレジストを塗布したウエハ上に光学的に縮小して投影露光する。この露光時におけるウエハ上での最小パターン寸法（解像度）を小さくするのに最も単純かつ有効な方法の一つは、露光光の波長（露光波長）を小さくすることである。ここで露光光の短波長化の実現と合わせて、露光光源を構成する上で備えるべきいくつかの条件につき説明する。

【0003】

第1に、例えば数ワットの光出力が求められる。これは集積回路パターンの露光、転写に要する時間を短くして、スループットを高めるために必要である。

第2に、露光光が波長300nm以下の紫外光の場合には、投影光学系の屈折部材（レンズ）として使用できる光学材料が限られ、色収差の補正が難しくなってくる。このため露光光の単色性が必要であり、露光光のスペクトル線幅は1pm程度以下にすることが求められる。

【0004】

第3に、このスペクトル線幅の狭帯化に伴い時間的コヒーレンス（可干渉性）が高くなるため、狭い線幅の光をそのまま照射すると、スペックルと呼ばれる不要な干渉パターンが生ずる。従ってこのスペックルの発生を抑制するために、露光光源では空間的コヒーレンスを低下させる必要がある。

これらの条件を満たす従来の短波長の光源の一つは、レーザの発振波長自身が短波長であるエキシマレーザを用いた光源であり、もう一つは赤外又は可視域のレーザの高調波発生を利用した光源である。

【0005】

このうち、前者の短波長光源としては、KrFエキシマレーザ（波長248nm）が使用されており、現在では更に短波長のArFエキシマレーザ（波長193nm）を使用する露光装置の開発が進められている。更に、エキシマレーザの仲間であるF₂レーザ（波長157nm）の使用も提案されている。しかし、これらのエキシマレーザは大型であること、発振周波数が現状では数kHz程度であるため、単位時間当たりの照射エネルギーを高めるためには1パルス当たりのエネルギーを大きくする必要があり、このためにいわゆるコンパクション等によって光学部品の透過率変動等が生じやすいうこと、メインテナンスが煩雑でかつ費用が高額となることなどの種々の問題があった。

【0006】

また後者の方法としては、非線形光学結晶の2次の非線形光学効果を利用して、長波長の光（赤外光、可視光）をより短波長の紫外光に変換する方法がある。例えば文献「"Longitudinally diode pumped continuous wave 3.5W green laser", L. Y. Liu, M. Oka, W. Wiechmann and S. Kubota; Optics Letters, vol.19, p189(1994)」では、半導体レーザ光で励起された固体レーザからの光を波長変換するレーザ光源が開示されている。この従来例では、Nd:YAGレーザの発する1064nmのレーザ光を、非線形光学結晶を用いて波長変換し、4倍高調波の266nmの光を発生させる方法が記載されている。なお、固体レーザとは、レーザ媒質が固体であるレーザの総称である。

【0007】

また、例えば特開平8-334803号公報では、半導体レーザを備えたレーザ光発生部と、このレーザ光発生部からの光を非線形光学結晶により紫外光に波長変換する波長変換部とから構成されるレーザ要素を複数個、マトリックス状（例えば10×10）に束ねたアレイレーザが提案されている。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】

このような構成の従来のアレイレーザでは、個々のレーザ要素の光出力を低く抑えつつ、装置全体の光出力を高出力とすることができます、各非線形光学結晶への負担を軽減することができます。しかし、一方では、個々のレーザ要素が独立していることから、露光装置への適用を考慮した場合には、レーザ要素全体でその発振スペクトルを全幅で 1 pm 程度以下まで一致させる必要がある。

【0009】

このため、例えば、各レーザ要素に自律的に同一波長の単一縦モード発振をさせるためには、各々のレーザ要素の共振器長を調整し、あるいは共振器中に波長選択素子を挿入したりする必要があった。しかし、これらの方法は、その調整が微妙であること、構成するレーザ要素が多くなるほど全体を同一波長で発振させるのに複雑な構成が必要になること等の問題があった。

【0010】

一方、これら複数のレーザを能動的に单一波長化する方法としてインジェクションシード法がよく知られている（例えば、「Walter Koechner; Solid-state Laser Engineering, 3rd Edition, Springer Series in Optical Science, Vol.1, Springer-Verlag, ISBN 0-387-53756-2, p246-249」参照）。これは、発振スペクトル線幅の狭い単一のレーザ光源からの光を複数のレーザ要素に分岐し、このレーザ光を誘導波として用いることにより、各レーザ要素の発振波長を同調させ、かつスペクトル線幅を狭帯域化するという方法である。しかし、この方法では、シード光を各レーザ要素に分岐する光学系や、発振波長の同調制御部を必要とするため構造が複雑になるという問題があった。

【0011】

更に、このようなアレイレーザは、従来のエキシマレーザに比べて装置全体を格段に小さくすることが可能だが、それでもアレイ全体の出力ビーム径を数 cm 以下におさえるパッケージングは困難であった。また、このように構成されたアレイレーザでは、各アレイごとに波長変換部が必要となるため高価となること、アレイを構成するレーザ要素の一部にアライメントずれが生じた場合や構成する光学素子に損傷が発生した場合に、このレーザ要素の調整をするためには、一度

アレイ全体を分解してそのレーザ要素を取り出し、調整した上で再度アレイを組み立て直す必要があること、などの課題があった。

【0012】

本発明は斯かる点に鑑み、露光装置の光源に使用できると共に、装置を小型化でき、かつメンテナンスの容易なレーザ装置を提供することを第1の目的とする。

更に本発明は、発振周波数を高くして、かつ空間的コヒーレンスを低減できると共に、全体としての発振スペクトル線幅を簡単な構成で狭くできるレーザ装置を提供することを第2の目的とする。

【0013】

更に本発明は、そのようなレーザ装置を露光光源として用いた露光方法、及びコンパクトで自由度の高い露光装置を提供することも目的とする。

【0014】

【課題を解決するための手段】

本発明による各レーザ装置は、基本的に紫外光を発生するレーザ装置であって、赤外域から可視域までの波長範囲内で单一波長のレーザ光を発生するレーザ光発生部（11）と、このレーザ光発生部から発生されたレーザ光を増幅する光ファイバー増幅器（22，25）を有する光増幅部（18-1）と、この光増幅部によって増幅されたレーザ光を非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換する波長変換部（20～20B）とを備えたものである。

【0015】

斯かる本発明の各レーザ装置によれば、そのレーザ光発生部としては、例えば発振波長が制御されたDFB（Distributed feedback）半導体レーザ、又はファイバーレーザ等の小型で発振スペクトルの狭い光源を使用することができる。そして、そのレーザ光発生部からの单一波長のレーザ光を光ファイバー増幅器で増幅した後、非線形光学結晶で紫外光に変換することによって、高出力で单一波長の狭いスペクトル幅の紫外光を得ることができる。従って、小型でかつメンテナンスの容易なレーザ装置を提供できる。

【0016】

この場合、光ファイバー増幅器としては、例えばエルビウム（E r）・ドープ・光ファイバー増幅器（Erbium-Doped Fiber Amplifier: EDFA）、イッテルビウム（Y b）・ドープ・光ファイバー増幅器（Y DFA）、プラセオジム（P r）・ドープ・光ファイバー増幅器（P DFA）、又はツリウム（T m）・ドープ・光ファイバー増幅器（T DFA）等を使用することができる。

【0017】

また、本発明の波長変換部の構成については、複数の非線形光学結晶の2次高調波発生（SHG）及び和周波発生（SFG）の組み合わせによって、基本波に対して任意の整数倍の周波数（波長は整数分の1）の高調波よりなる紫外光を容易に出力することができる。この際に、できるだけ変換効率を高くする必要がある。

【0018】

そこで、本発明の第1のレーザ装置では、その波長変換部（20）は、その光増幅部によって増幅されたレーザ光を波長変換する複数の非線形光学結晶（502～504）と、波長変換時の位相整合角の調整を行うためにその複数の非線形光学結晶のそれぞれの温度制御を行う複数の温度制御装置（521～523）とを備えている。このように温度制御によって全部の非線形結晶の位相整合角の調整（例えば最終的な微調整）を行うことによって、簡単な制御で変換効率を高くできる。また、このように波長変換のための位相整合を結晶の温度調節によって行う場合は、非臨界位相整合（Non-Critical Phase Matching: NCPM）を使用することができ、NCPMでは、非線形光学結晶内での基本波と高調波との間の角度ずれである「Walk-off」が起こらないという利点もある。更に、位相整合角度の許容誤差（アクセプタンスアングル）が2桁程度大きいため、アライメント誤差を大きくできて、製造・組立が容易である。

【0019】

また、本発明の第2のレーザ装置では、その波長変換部において、その複数個の非線形光学結晶の少なくとも一つ、特に基本波及び7倍波から和周波発生による8倍波を紫外光として発生する部分（622）に四ほう酸リチウム（Li₂B₄O₇）の結晶、即ちLB4結晶を使用している。これによって高い変換効率が

得られると共に、紫外光に対する耐久性に優れている。

【0020】

また、本発明の第3のレーザ装置では、その波長変換部において、その複数個の非線形光学結晶の少なくとも一つ、特に基本波及び7倍波から和周波発生による8倍波を紫外光として発生する部分(622)、又は4倍波から二次高調波発生による8倍波を紫外光として発生する部分(504)に $K_2Al_2B_4O_7$ の結晶、即ちKAB結晶を使用している。これによって高い変換効率が得られる。

【0021】

また、本発明の第4のレーザ装置では、その波長変換部において、その複数個の非線形光学結晶の少なくとも一つ、特に2倍波から4倍波を発生する部分(503)に $Gd_xY_{1-x}Ca_4O(BO_3)_3$ の結晶、即ちGdYCOBの結晶を使用する。この際に、組成を表すパラメータ x ($0 \leq x \leq 1$) の値を調整して複屈折率の調整を行って、4倍波の発生を非臨界位相整合(NCPM)で行えるような結晶にしておく。これによって非線形光学結晶内での基本波(2倍波)と高調波(4倍波)との間の角度ずれである「Walk-off」が生じないため、発生した高調波も入射光と同じ対称性を保つ。従って、例えば次段で4倍波と3倍波とから7倍波を発生するような場合に、両者のビーム形状を合わせるために複雑なビーム補正を行うことなく、高い変換効率が得られる。

【0022】

また、本発明の第5のレーザ装置では、紫外光を発生するレーザ装置であって、赤外域から可視域までの波長範囲内で单一波長のレーザ光を発生するレーザ光発生部(11)と、該レーザ光発生部から発生されたレーザ光を増幅する光ファイバー増幅器を有する光増幅部(18-1)と、この光増幅部によって増幅されたレーザ光を複数個の非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換すると共に、その複数個の非線形光学結晶の間でレーザ光をリレーする複数個のリレー光学系を備えた波長変換部とを備え、その複数個のリレー光学系中をそれぞれ1つの波長の光が通過する配置としたものである。

【0023】

この場合、各リレー光学系中を1波長の光のみが通過するため、色収差の補正

が容易になって、変換効率が向上する。この構成では、その波長変換部は、基本波の7倍波とその基本波とから8倍波を生成すると共に、その7倍波を生成する際に、基本波、2倍波、5倍波、及び6倍波中の2つの光の和周波発生を用いることが望ましい。これによって、例えば波長221nmの7倍波を発生する際に、 β -BaB₂O₄ (BBO) 結晶を用いる必要がなくなり、波長変換部の耐久性が向上する。これに対して、3倍波と4倍波とから7倍波を発生する場合には、7倍波を吸収し易いBBO結晶を用いる必要があるために、耐久性が低下する恐れがある。

【0024】

これらの各レーザ装置においては、そのレーザ光発生部から発生するレーザ光を複数に分岐する光分岐手段 (14, 16-1~16-m) を更に備え、その光増幅部 (18-1~18-n) はその複数に分岐されたレーザ光のそれぞれに独立に設けられると共に、その波長変換部は、その複数の光増幅部から出力されたレーザ光の束をまとめて波長変換することが望ましい。このように光分岐手段で分岐したレーザ光に順次所定の光路長差を付与することで、最終的に束ねられるレーザ光の空間的コヒーレンスが低減できる。また、各レーザ光は共通のレーザ光発生部から発生しているため、最終的に得られる紫外光のスペクトル線幅は狭くなっている。

【0025】

次に、本発明の第6のレーザ装置は、紫外光を発生するレーザ装置であって、赤外域から可視域までの波長範囲内で单一波長のレーザ光を発生するレーザ光発生部 (11) と、このレーザ光発生部から発生されたレーザ光を複数の光束に分岐する光分岐部 (14, 16-1~16-m) と、この光分岐部で分岐された複数の光束のそれぞれを光ファイバー増幅器 (22, 25) を用いて増幅する複数の光増幅部 (18-1~18-n) と、この複数の光増幅部からの複数の光束を束ねたレーザ光を複数個の非線形光学結晶 (601, 604, 607, 615, 622) を用いて紫外光に波長変換する波長変換部 (20B) とを備え、その波長変換部は、そのレーザ光の基本波又は高調波よりなる第1ビーム (650)、及びそのレーザ光の高調波よりなる第2ビーム (660) の和周波発生によって

高調波を発生する非線形結晶（615）と、その第1ビームを構成する複数の光束のそれぞれと、その第2ビームを構成する複数の光束のそれぞれとの大きさを整合させるために交差する2方向で倍率の異なる非等方的光学系（612）とを有するものである。

【0026】

斯かる本発明によれば、小型でかつメンテナンスが容易であると共に、最終的に束ねられるレーザ光の空間的コヒーレンスが低減できる。また、各レーザ光は共通のレーザ光発生部から発生しているため、最終的に得られる紫外光のスペクトル線幅は狭くなっている。

更に、その波長変換部においては、波長変換で角度位相整合を行う場合、結晶の複屈折性により「Walk-off」が生じる。この場合、出力ビームは長円形状の非対称な形になる。この出力ビームを次段の非線形光学結晶に入射光として使う場合、変換効率をあげるためにビームを整形する必要がある。ビーム整形を行う過程で、縦と横との倍率が異なる光学系を使用することになる。5段の波長変換で193nm発生を行う構成例では、4倍波発生、及び7倍波発生で「Walk-off」が生じるため、これらの後に、シリンドリカル・レンズ対等の縦と横との倍率が異なる光学系が使用される。この場合、バンドル（複数の光束の束）を構成する複数の光束のそれぞれのビーム形状は整形されるが、バンドル全体の形状も使用したレンズ系の縦と横との倍率に対応した倍率により変形する。

【0027】

例えば、4倍波出力を縦と横との倍率が異なる光学系により整形した場合については、次段の7倍波発生では4倍波と3倍波とのビームを重ねあわせる必要がある。ビームの重ねあわせでは、2つの光束において、バンドルの各ビーム位置を合わせることと、各々のビーム同士の重ねあわせが良いことが要求される。縦と横との倍率が異なる光学系により整形された4倍波は、バンドル全体の形状 자체も使用したレンズ系の縦と横との倍率に対応した倍率により変形している。一方、3倍波のバンドル形状、及び個々のビーム形状は4倍波と異なるためこの2つを同時に調整する必要がある。このために、バンドル形状の整形を行う光学系の倍率と、個々のビーム形状の整形を行う光学系の倍率を独立に設定する必要が

ある。従って、通常のシリンドリカルレンズ対、あるいは、レンズとシリンドリカルレンズとの組み合わせ（609, 610）に加えて、各ビームの縦と横との倍率を違える非等方的光学系（612）、例えばシリンドリカルレンズのアレイ、プリズムのアレイ、又は微細な回折格子を所定の配列で分布させたD.O.E（Diffractive Optical Element:回折光学素子）等も合わせて用いることで、2つのビームの重なり部の割合が最大になり、高い変換効率が得られる。

【0028】

その非等方的光学系の挿入位置としては、波長が赤外域又は可視域である基本波、又は低次（3次、4次等）の高調波の光路上が望ましい。これらの波長では、光学材料の選択自由度が広いため適切な材料を選べる。

更に、本発明において、そのレーザ光は光変調器等によって例えば100kHz程度の高い周波数で容易に変調することができる。従って、エキシマレーザ光（周波数は数kHz程度）を使用する場合に比べて、同じ照度を得るためにパルスエネルギーを1/10～1/100程度にできるため、露光光源として用いた場合に、コンパクション等による光学部材の透過率変動が殆ど無くなり、安定にかつ高精度に露光を行うことができる。

【0029】

そして、例えばレーザ光発生部で波長が1.5μm、特に1.544～1.552μmに限定されたレーザ光を放射し、波長変換部でその基本波の8倍高調波の発生を行う構成によって、ArFエキシマレーザと実質的に同一波長の193～194nmの紫外光が得られる。また、レーザ光発生部として波長が1.5μm付近、特に1.57～1.58μmに限定されたレーザ光を放射し、波長変換部でその基本波の10倍高調波の発生を行う構成によって、F₂レーザと実質的に同一波長の157～158nmの紫外光が得られる。同様に、例えばレーザ光発生部として波長が1.1μm付近、特に1.099～1.106μmに限定されたレーザ光を放射し、波長変換部でその基本波の7倍高調波の発生を行う構成によって、F₂レーザと実質的に同一波長の紫外光が得られる。

【0030】

また、本発明の露光方法は、本発明のレーザ装置からの紫外光をマスクに照射

し、このマスクのパターンを通過した紫外光で基板を露光するものである。そして、本発明の露光装置は、上記の本発明のレーザ装置を露光光源として用い、このレーザ装置からの紫外光をマスクに照射する照明系と、そのマスクのパターンの像を基板上に投影する投影光学系とを有し、そのマスクのパターンを通過した紫外光でその基板を露光するものである。本発明のレーザ装置の使用によって、露光装置全体を小型化でき、かつメンテナンスが容易になる。

【0031】

【発明の実施の形態】

以下、本発明の実施の形態の一例につき図面を参照して説明する。本例は、ステッパー等の投影露光装置の紫外域の露光光源、又はアライメントや各種検査用の光源として使用できる紫外光発生装置に本発明のレーザ装置を適用したものである。

【0032】

図1 (a) は、本例の紫外光発生装置を示し、この図1 (a) において、レーザ光発生部としての単一波長発振レーザ11からスペクトル幅の狭い単一波長の連続波 (CW) よりなる波長 $1.544 \mu m$ のレーザ光LB1が発生する。このレーザ光LB1は、逆向きの光を阻止するためのアイソレータIS1を介して光変調器としての光変調素子12に入射し、ここでパルス光のレーザ光LB2に変換されて光分岐増幅部4に入射する。

【0033】

光分岐増幅部4に入射したレーザ光LB2は、先ず前段の光増幅部としての光ファイバー増幅器13を通過して増幅された後、アイソレータIS2を介して第1の光分岐素子としての平面導波路型のスプリッタ14に入射して、 m 本のほぼ同一強度のレーザ光に分岐される。 m は2以上の整数であり、本例では $m=4$ である。光ファイバー増幅器13としては、単一波長発振レーザ11から発生されるレーザ光LB1と同じ波長域（本例では $1.544 \mu m$ 付近）の光を増幅するために、エルビウム・ドープ・光ファイバー増幅器（Erbium-Doped Fiber Amplifier: EDFA）が使用されている。なお、光ファイバー増幅器13には不図示のカップリング用の波長分割多重素子を介して不図示の励起用の半導体レーザか

らの波長（980±10）nm又は（1480±30）nmの励起光が供給されている。EDFAにおいて非線形効果による波長の広がりを防止するためには、励起光として波長（980±10）nmのレーザ光を使用して、ファイバー長を短くすることが望ましい。これは後段の光ファイバー増幅器についても同様である。

【0034】

なお、イッテルビウム（Yb）・ドープ・光ファイバー、及びエルビウムとイッテルビウムとをコ・ドープした光ファイバーの励起光としては（970±10）nmの光が使用できる。

スプリッタ14から射出されたm本のレーザ光は、互いに異なる長さの光ファイバー15-1, 15-2, …, 15-mを介してそれぞれ第2の光分岐素子としての平面導波路型のスプリッタ16-1, 16-2, …, 16-mに入射して、それぞれほぼ同一強度のn本のレーザ光に分岐される。nは2以上の整数であり、本例ではn=32である。第1の光分岐素子（14）及び第2の光分岐素子（16-1～16-m）が本発明の光分割手段（光分割部）に対応する。その結果、单一波長発振レーザ11から射出されるレーザ光LB1は、全体としてn・m本（本例では128本）のレーザ光に分割される。

【0035】

そして、スプリッタ16-1から射出されたn本のレーザ光LB3は、互いに異なる長さの光ファイバー17-1, 17-2, …, 17-nを介してそれぞれ後段の光増幅部としての光増幅ユニット18-1, 18-2, …, 18-nに入射して増幅される。光増幅ユニット18-1～18-nは、单一波長発振レーザ11から発生されるレーザ光LB1と同じ波長域（本例では1.544μm付近）の光を増幅する。同様に他のスプリッタ16-2～16-mから射出されたn本のレーザ光も、それぞれ互いに異なる長さの光ファイバー17-1～17-nを介して後段の光増幅部としての光増幅ユニット18-1～18-nに入射して増幅される。

【0036】

m組の光増幅ユニット18-1～18-nで増幅されたレーザ光は、それぞれ

光増幅ユニット18-1～18-n内の所定の物質がドープされた光ファイバー（後述）の射出端の延長部を伝播し、これらの延長部が光ファイバー・バンドル19を構成する。光ファイバー・バンドル19を構成するm組のn本の光ファイバーの延長部の長さは互いにほぼ同一である。但し、光ファイバー・バンドル19をm・n本の互いに同じ長さの無ドープの光ファイバーを束ねて形成すると共に、光増幅ユニット18-1～18-nで増幅されたレーザ光をそれぞれ対応する無ドープの光ファイバーに導いてもよい。光ファイバー増幅器13から光ファイバー・バンドル19までの部材より光分岐増幅部4が構成されている。

【0037】

光ファイバー・バンドル19から射出されたレーザ光LB6は、非線形光学素子を有する波長変換部20に入射して紫外光よりなるレーザ光LB5に変換され、このレーザ光LB5が露光光、アライメント光、又は検査用の光として外部に射出される。m組の光増幅ユニット18-1～18-nがそれぞれ本発明の光増幅部に対応しているが、この光増幅部に光ファイバー・バンドル19の光ファイバーを含める場合もある。

【0038】

また、光ファイバー・バンドル19の出力端19aは、図1（b）に示すように、m・n本（本例では128本）の光ファイバーを密着するように、かつ外形が円形になるように束ねている。実際には、その出力端19aの形状及び束ねる光ファイバーの数は、後段の波長変換部20の構成、及び本例の紫外光発生装置の使用条件等に応じて定められる。光ファイバー・バンドル19を構成する各光ファイバーのクラッド直径は $125\mu m$ 程度であることから、128本を円形に束ねた場合の光ファイバー・バンドル19の出力端19aの直径d1は、約2mm以下とすることができます。

【0039】

また、本例の波長変換部20では、入射するレーザ光LB6を8倍高調波（波長は $1/8$ ）、又は10倍高調波（波長は $1/10$ ）よりなるレーザ光LB5に変換する。单一波長発振レーザ11から射出されるレーザ光LB1の波長は $1.544\mu m$ であるため、8倍高調波の波長はArFエキシマレーザと同じ193

nmとなり、10倍高調波の波長はF₂レーザ（フッ素レーザ）の波長（157nm）とほぼ同じ154nmとなる。なお、レーザ光LB5の波長をよりF₂レーザ光の波長に近付けたい場合には、波長変換部20で10倍高調波を生成すると共に、単一波長発振レーザ11では波長1.57μmのレーザ光を発生すればよい。

【0040】

実用的には、単一波長発振レーザ11の発振波長を1.544～1.552μm程度に規定して、8倍波に変換することにより、ArFエキシマレーザと実質的に同一波長（193～194nm）の紫外光が得られる。そして、単一波長発振レーザ11の発振波長を1.57～1.58μm程度に規定して、10倍波に変換することによってF₂レーザと実質的に同一波長（157～158nm）の紫外光が得られる。従って、これらの紫外光発生装置をそれぞれArFエキシマレーザ光源、及びF₂レーザ光源に代わる安価でメンテナンスの容易な光源として使用することができる。

【0041】

なお、最終的にArFエキシマレーザ、又はF₂レーザ等に近い波長域の紫外光を得る代わりに、例えば製造対象の半導体デバイス等のパターンルールより最適な露光波長（例えば160nm等）を決定し、この理論的に最適な波長の紫外光を得るように単一波長発振レーザ11の発振波長や波長変換部20における高調波の倍率を決定するようにしてもよい。

【0042】

以下、本実施形態についてより詳細に説明する。図1(a)において、単一波長で発振する単一波長発振レーザ11としては、例えば発振波長1.544μm、連続波出力（以下、「CW出力」ともいう）で出力が20mWのInGaAsP構造のDFB(Distributed feedback: 分布帰還型)半導体レーザを用いる。ここでDFB半導体レーザとは、縦モード選択性の低いファブリーペロー型共振器の代わりに、回折格子を半導体レーザ内に形成したもので、どのような状況下であっても単一縦モード発振を行うように構成されている。DFB半導体レーザは、基本的に単一縦モード発振をすることから、その発振スペクトル線幅は0.

0.1 pm以下に抑えられる。なお、単一波長発振レーザ11としては、同様の波長領域で狭帯域化されたレーザ光を発生する光源、例えばエルビウム(Er)・ドープ・ファイバー・レーザ等をも使用することができる。

【0043】

更に、本例の紫外光発生装置の出力波長は用途に応じて特定波長に固定することが望ましい。そのため、マスター発振器(Master Oscillator)としての単一波長発振レーザ11の発振波長を一定波長に制御するための発振波長制御装置を設けている。本例のように単一波長発振レーザ11としてDFB半導体レーザを用いる場合には、DFB半導体レーザの温度制御を行うことにより発振波長を制御することができ、この方法により発振波長を更に安定化して一定の波長に制御したり、あるいは出力波長を微調整することができる。

【0044】

通常、DFB半導体レーザなどはヒートシンクの上に設けられ、これらが筐体内に収納されている。そこで本例では、単一波長発振レーザ11(DFB半導体レーザなど)に付設されるヒートシンクに温度調整部5(例えばヒータ等の加熱素子、ペルチエ素子等の吸熱素子、及びサーミスタ等の温度検出素子よりなる)を固定し、その温度調整部5の動作をコンピュータよりなる制御部1がドライバ3を介して制御して、そのヒートシンク、ひいては単一波長発振レーザ11の温度を高精度に制御する。ここで、DFB半導体レーザなどではその温度を0.001°C単位で制御することが可能である。また、制御部1は、ドライバ2を介して単一波長発振レーザ11を駆動するための電力(DFB半導体レーザでは駆動電流)を高精度に制御する。

【0045】

DFB半導体レーザの発振波長は0.1 nm/°C程度の温度依存性を持つため、そのDFB半導体レーザの温度を例えば1°C変化させると、基本波(波長1544 nm)ではその波長が0.1 nm変化する。従って、8倍波(193 nm)ではその波長が0.0125 nm変化し、10倍波(157 nm)ではその波長が0.01 nm変化することになる。なお、レーザ光LB5を露光装置に使用する場合には、例えば露光装置が設置される環境の大気圧差による結像特性の誤差

、又は結像特性の変動による誤差等を補正するために、その中心波長に対して±20 pm程度変化できることが望ましい。このためには、DFB半導体レーザの温度を8倍波では±1.6°C程度、10倍波では±2°C程度変化させればよく、これは実用的である。

【0046】

そして、この発振波長を所定の波長に制御する際のフィードバック制御のモニター波長としては、DFB半導体レーザの発振波長、あるいは後述する波長変換部20内の波長変換後の高調波出力（2倍波、3倍波、4倍波等）の内から所望の波長制御を行うに当たって必要な感度を与え、かつ最もモニターしやすい波長を選択すればよい。単一波長発振レーザ11として例えば発振波長1.51～1.59 μmのDFB半導体レーザを使用する場合に、この発振されるレーザ光の3倍波は503 nm～530 nmの波長になるが、この波長帯はヨウ素分子の吸収線が密に存在する波長域に該当しており、ヨウ素分子の適切な吸収線を選んでその波長にロックすることにより精密な発振波長制御を行うことが可能である。そこで、本例では波長変換部20内の所定の高調波（望ましくは3倍波）をヨウ素分子の適切な吸収線（基準波長）と比較し、その波長のずれ量を制御部1にフィードバックし、制御部1ではそのずれ量が所定の一定値になるように单一波長発振レーザ11の温度を制御する。逆に、制御部1では、その单一波長発振レーザ11の発振波長を積極的に変化させてその出力波長を調整可能にしてもよい。

本例の紫外光発生装置を例えば露光装置の露光光源に適用する場合、前者によれば、波長変動による投影光学系の収差の発生、又はその変動が防止され、パターン転写中にその像特性（像質などの光学的特性）が変化することがなくなる。

【0047】

また、後者によれば、露光装置が組立、調整される製造現場と露光装置の設置場所（納入先）との標高差や気圧差、更には環境（クリーンルーム内の雰囲気）の違いなどに応じて生じる投影光学系の結像特性（収差など）の変動を相殺でき、納入先で露光装置の立ち上げに要する時間を短縮することが可能になる。更に後者によれば、露光装置の稼働中に、露光用照明光の照射、及び大気圧変化など

に起因して生じる投影光学系の収差、投影倍率、及び焦点位置などの変動も相殺でき、常に最良の結像状態でパターン像を基板上に転写することが可能となる。

【0048】

単一波長発振レーザ11から出力される連続光よりなるレーザ光LB1は、例えば電気光学光変調素子や音響光学光変調素子などの光変調素子12を用いて、パルス光よりなるレーザ光LB2に変換される。本構成例では一例として、この光変調素子12によってパルス幅1ns、繰り返し周波数100kHz（パルス周期10μs）のパルス光に変調させた場合について説明を行う。この様な光変調を行った結果、光変調素子12から出力されるパルス光のピーク出力は20mW、平均出力は2μWとなる。ここでは、光変調素子12の挿入による損失がないものとしたが、実際にはその挿入損失がある。例えば損失が-3dBである場合、パルス光のピーク出力は10mW、平均出力は1μWとなる。

【0049】

なお、光変調素子12として電気光学変調素子を用いる場合には、屈折率の時間変化に伴うチャープによる半導体レーザ出力の波長広がりが小さくなるよう、チャープ補正を行った電極構造を持つ電気光学変調素子（例えば二電極型変調器）を用いることが好ましい。また、繰り返し周波数を100kHz程度以上に設定することにより、後述する光増幅ユニット18-1～18-n内の光ファイバー増幅器においてASE（Amplified Spontaneous Emission：自然放出光）ノイズの影響による増幅率低下を阻止することができる。更に、最終的に出力される紫外光の照度が従来のエキシマレーザ光（パルス周波数は数kHz程度）と同程度でよい場合には、本例のようにパルス周波数を高め、各パルス光を例えば128個の遅延パルス光の集合とすることによって、各パルス当たりのエネルギーを1/1000～1/10000程度に小さくすることができ、コンパクション等による光学部材（レンズ等）の屈折率変動等を小さくすることができる。従って、そのような変調器構成とすることが望ましい。

【0050】

更に、半導体レーザなどではその電流制御を行うことで、出力光をパルス発振させることができる。このため、本例では単一波長発振レーザ11（DFB半導

体レーザなど)の電力制御と光変調素子12とを併用してパルス光を発生させることが好ましい。そこで、单一波長発振レーザ11の電力制御によって、例えば10~20 ns程度のパルス幅を有するパルス光を発振させると共に、光変調素子12によってそのパルス光からその一部のみを切り出す、即ち本例ではパルス幅が1 nsのパルス光に変調する。

【0051】

これにより、光変調素子12のみを用いる場合に比べて、パルス幅が狭いパルス光を容易に発生させることができると共に、パルス光の発振間隔や発振の開始及びその停止などをより簡単に制御することが可能になる。特に、光変調素子12のみを用いてパルス光をオフの状態にしてもその消光比が充分でない場合には、单一波長発振レーザ11の電力制御を併用することが望ましい。

【0052】

このようにして得たパルス光出力を、初段のエルビウム・ドープの光ファイバー増幅器13に接続し、35 dB (3162倍)の光増幅を行う。このときパルス光は、ピーク出力約63 W、平均出力約6.3 mWとなる。なお、この光ファイバー増幅器13の代わりに複数段の光ファイバー増幅器を使用してもよい。

その初段の光ファイバー増幅器13の出力を、スプリッタ14でまずチャネル0~3の4個の出力(本例ではm=4)に並列分割する。このチャネル0~3の各出力を、各々長さの異なる光ファイバー15-1~15-4に接続することにより、各光ファイバーからの出力光には、光ファイバー長に対応した遅延時間が与えられる。例えば本実施形態では、光ファイバー中の光の伝搬速度を 2×10^8 m/sであるとし、チャネル0、1、2、3にそれぞれ0.1 m、1.9.3 m、3.8.5 m、5.7.7 mの長さの光ファイバー15-1~15-4を接続する。この場合、各光ファイバーの出口での隣り合うチャネル間の光の遅延は9.6 nsとなる。この様に光を遅延させるための遅延素子として使用する光ファイバー15-1~15-4を、便宜的に「遅延ファイバー」と呼ぶ。

【0053】

次に、その4本の遅延ファイバーの出力を、4個のスプリッタ16-1~16-4で更に32個(本例ではn=32)の出力に並列分割(各スプリッタでチャ

ネル0～31) し、合計4・32個(=128個)のチャネルに分割する。そして、各スプリッタ16-1～16-4のチャネル0～31の出力端に再び互いに長さの異なる光ファイバー(遅延ファイバー)17-1～17-32を接続して、隣接するチャネル間に3nsの遅延時間を与える。これによって、チャネル31の出力には、93nsの遅延時間が与えられる。一方、第1から第4までの各スプリッタ16-1～16-4間には、前記のように遅延ファイバーによって、各スプリッタの入力時点で各々96nsの遅延時間が与えられている。この結果、全体で総計128チャネルの出力端で、隣り合うチャネル間に3nsの遅延時間を持つパルス光が得られる。

【0054】

この結果、本例では光ファイバー・バンドル19から射出されるレーザ光LB6の空間的コヒーレンスが、単に単一波長発振レーザ11から射出されるレーザ光LB1の断面形状を拡大した場合に比べてほぼ1/128のオーダで低下する。従って、最終的に得られるレーザ光LB5を露光光として用いた場合に生じるスペックルの量は極めて少ない利点がある。

【0055】

以上の分岐及び遅延により、総計128チャネルの出力端では、隣り合うチャネル間で3nsの遅延時間を持つパルス光が得られるが、このとき各々の出力端で観測される光パルスは、光変調素子12によって変調されたパルス光と同じ100kHz(パルス周期10μs)である。従って、レーザ光発生部全体として見ると、128パルスが3ns間隔で発生した後、9.62μsの間隔を置いて次のパルス列が発生するという繰り返しが100kHzで行われる。

【0056】

なお本実施形態では、分割数を128とし、また遅延ファイバーとして短いものを用いた例について説明した。このため各パルス列の間に9.62μsの無発光の間隔が生じたが、分割数m, nを増加させる、又は遅延ファイバーをより長くして適切な長さとする、あるいはこれらを組み合わせて用いることにより、パルス間隔を完全な等間隔とすることも可能である。

【0057】

以上より本例のスプリッタ14、光ファイバー15-1～15-m、スプリッタ16-1～16-m、及びm組の光ファイバー17-1～17-nは、全体として時分割多重 (Time Division Multiplexing : TDM) 手段を構成しているともみなすことができる。なお、本例では時分割多重手段を2段のスプリッタによって構成しているが、それを3段以上のスプリッタで構成してもよく、又は分割数は少なくなるが1段のスプリッタのみで構成してもよい。また、本例のスプリッタ14、16-1～16-mは平板導波路型であるが、それ以外に例えばファイバースプリッタや、部分透過鏡を用いたビームスプリッタ等も使用することができる。

【0058】

また、本例では光変調素子12に印加するドライブ用電圧パルスのタイミングを制御することによって、光源（パルス光）の発振タイミング、即ち繰り返し波数fを調整することができる。更に、この発振タイミングの変更に伴ってパルス光の出力が変動し得る場合には、光変調素子12に印加するドライブ用電圧パルスの大きさも同時に調整してその出力変動を補償するようにしてもよい。このとき、単一波長発振レーザ11の発振制御のみ、あるいは前述した光変調素子12の制御との併用によってそのパルス光の出力変動を補償するようにしても良い。

【0059】

図1 (a)において、m組の遅延ファイバー（光ファイバー17-1～17-n）を通過したレーザ光はそれぞれ光増幅ユニット18-1～18-nに入射して増幅される。本例の光増幅ユニット18-1～18-nは光ファイバー増幅器を備えている。以下では、光増幅ユニット18-1として使用できる光増幅ユニット18の構成例につき説明するが、これらは他の光増幅ユニット18-2～18-nとしても同様に使用することができる。

【0060】

図2は、光増幅ユニット18を示し、この図2において、光増幅ユニット18は基本的に2段のそれぞれエルビウム・ドープ・光ファイバー増幅器 (Erbium-Doped Fiber Amplifier : EDFA) よりなる光ファイバー増幅器22及び25を接続して構成されている。そして、1段目の光ファイバー増幅器22の両端部に

は、励起光をカップリングするための波長分割多重 (Wavelength Division Multiplexing: WDM) 素子 (以下、「WDM素子」と言う) 21A及び21Bが接続され、WDM素子21A及び21Bによってそれぞれ励起光源としての半導体レーザ23Aからの励起光EL1及び半導体レーザ23Bからの励起光が、光ファイバー増幅器22に前後から供給されている。同様に、2段目の光ファイバー増幅器25の両端部にも、カップリング用のWDM素子21C及び21Dが接続され、WDM素子21C及び21Dによってそれぞれ半導体レーザ23C及び23Dからの励起光が光ファイバー増幅器25に前後から供給されている。即ち、光ファイバー増幅器22, 25は共に双方向励起型である。

【0061】

光ファイバー増幅器22, 25はそれぞれ入射するレーザ光LB3 (本例では波長1.544μm) の波長を含む例えれば約1.53~1.56μm程度の波長域の光を増幅する。また、光ファイバー増幅器22, 25の境界部であるWDM素子21BとWDM素子21Cとの間に、狭帯域フィルタ24A及び戻り光を阻止するためのアイソレータIS3が配置されている。狭帯域フィルタ24Aとしては多層膜フィルタ、又はファイバー・プラック・グレーティング (Fiber Bragg Grating)が使用できる。

【0062】

本例において、図1 (a) の光ファイバー17-1からのレーザ光LB3は、WDM素子21Aを介して光ファイバー増幅器22に入射して増幅される。この光ファイバー増幅器22で増幅されたレーザ光LB3は、WDM素子21B、狭帯域フィルタ24A、アイソレータIS3、及びWDM素子21Cを介して光ファイバー増幅器25に入射して再び増幅される。増幅されたレーザ光LB3は、WDM素子21Dを介して図1 (a) の光ファイバー・バンドル19を構成する1本の光ファイバー (光ファイバー増幅器25の射出端の延長部でもよい) を伝播する。

【0063】

この場合、2段の光ファイバー増幅器22及び25による合計の増幅利得は一例として約46dB (39810倍) である。そして、図1 (b) のスプリッタ

16-1～16-mから出力される全チャネル数(m・n個)を128個として、各チャネルの平均出力を約 $50\mu\text{W}$ とすると、全チャネル合計での平均出力は約 6.4mW となる。その各チャネルのレーザ光をそれぞれ約46dBで増幅すると、各光増幅ユニット18-1～18-nから出力されるレーザ光の平均出力はそれぞれ約2Wとなる。これをパルス幅1ns、パルス周波数100kHzでパルス化したものとすると、各レーザ光のピーク出力は20kWとなる。また、光ファイバー・バンドル19から出力されるレーザ光LB6の平均出力は約256Wとなる。

【0064】

ここでは、図1(a)のスプリッタ14、16-1～16-mでの結合損失を考慮していないが、その結合損失がある場合にはその損失分だけ光ファイバー増幅器22、25の少なくとも1つの増幅利得を上げることにより、各チャネルのレーザ光の出力を上記の値(例えばピーク出力20kWなど)に均一化することができる。なお、図2の光ファイバー増幅器22及び25による増幅利得を変化させることで、図1(a)の単一波長発振レーザ11の出力(基本波の出力)を前述した値よりも大きくしたり、あるいは小さくしたりすることができる。

【0065】

図2の構成例において、狭帯域フィルタ24Aは、図1(a)の光ファイバー増幅器13及び図2の光ファイバー増幅器22でそれぞれ発生するASE(Amplified Spontaneous Emission)光をカットし、かつ図1(a)の単一波長発振レーザ11から出力されるレーザ光(波長幅は1pm程度以下)を透過させることで、透過光の波長幅を実質的に狭帯化するものである。これにより、ASE光が後段の光ファイバー増幅器25に入射してレーザ光の増幅利得を低下させるのを防止することができる。ここで、狭帯域フィルタ24Aはその透過波長幅が1pm程度であることが好ましいが、ASE光の波長幅は数十nm程度であるので、現時点で得られる透過波長幅が100pm程度の狭帯域フィルタを用いても実用上問題がない程度にASE光をカットすることができる。

【0066】

また、図1(a)の単一波長発振レーザ11の出力波長を積極的に変化させる

場合、その出力波長に応じて狭帯域フィルタ24Aを交換するようにしてもよいが、その出力波長の可変幅（露光装置では一例として前述した±20pm程度）に応じた透過波長幅（可変幅と同程度以上）を持つ狭帯域フィルタを用いることが好ましい。更に、アイソレータIS3によって戻り光の影響が低減されて、更にASEノイズが低減しているために、最終段の光ファイバー増幅器25の他の非線形効果であるSRS (Stimulated Raman Scattering) 及びSBS (Stimulated Brillouin Scattering) の影響も低減されるため、波長幅の広がりが抑制される。光増幅ユニット18は例えば3段以上の光ファイバー増幅器を接続して構成することも可能であるが、この場合にも隣接する2つの光ファイバー増幅器の境界部の全てに狭帯域フィルタ24A及びアイソレータIS3を挿入することが望ましい。

【0067】

また、本例では多数の光増幅ユニット18の出力光を束ねて使用するため、各出力光の強度の分布を均一化することが望ましい。このためには、例えばWDM素子21Dから射出されるレーザ光LB3の一部を分離し、この分離された光を光電変換することによって、射出されるレーザ光LB3の光量をモニタし、この光量が全部の光増幅ユニット18でほぼ均一になるように、各光増幅ユニット18における励起光源（半導体レーザ23A～23D）の出力を制御すればよい。

【0068】

なお、上記の実施の形態では、单一波長発振レーザ11として発振波長が1.544μm程度のレーザ光源が使用されているが、その代わりに発振波長1.099～1.106μm程度のレーザ光源を使用してもよい。このようなレーザ光源としては、DFB半導体レーザあるいはイッテルビウム(Yb)・ドープ・ファイバーレーザが使用できる。この場合には、後段の光増幅部中の光ファイバー増幅器としては、その波長を含む990～1200nm程度の波長域で増幅を行うイッテルビウム(Yb)・ドープ・光ファイバー増幅器(YDFA)を使用すればよい。この場合には、図1(b)の波長変換部20において、7倍波を出力することによって、F₂レーザと実質的に同一の波長157～158nmの紫外光が得られる。実用的には、発振波長を1.1μm程度とすることで、F₂レー

ザとほぼ同一波長の紫外光が得られる。

【0069】

更には、単一波長発振レーザ11での発振波長を990nm付近として、波長変換部20で基本波の4倍波を出力するようにしてもよい。これによって、KrFエキシマレーザと同一の波長248nmの紫外光を得ることが可能である。

なお、上記の実施形態における最終段の高ピーク出力の光ファイバー増幅器（例えば図2の光ファイバー増幅器25）においては、ファイバー中の非線形効果による増幅光のスペクトル幅の増加を避けるため、ファイバーモード径が通常通信で用いられているもの（5～6μm）よりも広い、例えば20～30μmの大モード径ファイバーを使用することが望ましい。

【0070】

更に、最終段の光ファイバー増幅器（例えば図2の光ファイバー増幅器25）において高出力を得るために、その大モード径ファイバーに代えて、ファイバー・クラッドが二重構造となったダブル・クラッド・ファイバーを用いるようにしてもよい。この光ファイバーでは、コアの部分にレーザ光の増幅に寄与するイオンがドープされており、増幅されるレーザ光（信号）がこのコア内を伝搬する。そして、コアを取り巻く第1クラッドに励起用半導体レーザをカップリングする。この第1クラッドはマルチモードであり、断面積も大きいため高出力の励起用半導体レーザ光の伝導が容易であり、マルチモード発振の半導体レーザを効率よくカップリングし、励起用光源を効率よく使用することができる。その第1クラッドの外周には第1クラッドの導波路を形成するための第2クラッドが形成されている。

【0071】

また、上記の実施の形態の光ファイバー増幅器として石英ファイバー、又はシリケイト系ファイバーを用いることができるが、これらの他にフッ化物系ファイバー、例えばZBLANファイバーを用いるようにしてもよい。このフッ化物系ファイバーでは、石英やシリケイト系などに比べてエルビウム・ドープ濃度を大きくすることができ、これにより増幅に必要なファイバー長を短縮することができる。このフッ化物系ファイバーは、特に最終段の光ファイバー増幅器（図2の

光ファイバー増幅器25)に適用することが望ましく、ファイバー長の短縮により、パルス光のファイバー伝播中の非線形効果による波長幅の広がりを抑えることができ、例えば露光装置に必要な波長幅が狭帯化された光源を得ることが可能となる。特に開口数が大きい投影光学系を有する露光装置でこの狭帯化光源が使用できることは、例えば投影光学系を設計、製造する上で有利である。

【0072】

ところで、前述のように二重構造のクラッドを持つ光ファイバー増幅器の出力波長として1.51~1.59μmを使用する場合には、ドープするイオンとしてエルビウム(Er)に加えイッテルビウム(Yb)と共にドープすることが好ましい。これは半導体レーザによる励起効率を向上させる効果があるためである。即ち、エルビウムとイッテルビウムとの両方をドープする場合、イッテルビウムの強い吸収波長が915~975nm付近に広がっており、この近傍の波長で各々異なる発振波長を持つ複数の半導体レーザを波長分割多重(WDM)により結合させて第1クラッドにカップリングすることで、その複数の半導体レーザを励起光として使用できるため大きな励起強度を実現することができる。

【0073】

また、光ファイバー増幅器のドープ・ファイバーの設計については、本例のように予め定められた一定の波長で動作する装置(例えば露光装置)では、所望の波長における光ファイバー増幅器の利得が大きくなるように材質を選択することが望ましい。例えば、ArFエキシマレーザと同じ出力波長(193~194nm)を得るために紫外レーザ装置において、光増幅器用ファイバーを用いる場合には所望の波長、例えば1.548μmで利得が大きくなる材質を選ぶことが望ましい。

【0074】

しかしながら、通信用ファイバーでは波長分割多重化通信のため、1.55μm付近の数十nmの波長領域で、比較的平坦な利得を持つように設計されている。そこで、例えば励起媒質としてエルビウム單一ドープのコアを持つ通信用ファイバーでは、この平坦な利得特性を実現するために、アルミニウムやリンをシリカファイバーにコ・ドープする手法が用いられる。このためこの種のファイバー

では、1. 548 μmで必ずしも利得が大きくならない。また、ドープ元素のアルミニウムは、1. 55 μm付近のピークを長波長側にシフトさせ、リンは短波長側にシフトさせる効果を持つ。従って、1. 547 μm近傍で利得を大きくするためには、少量のリンをドープすればよい。同様に、例えばエルビウムとイッテルビウムとを共にドープ（コ・ドープ）したコアを持つ光増幅器用ファイバー（例えば前記ダブル・クラッド・タイプのファイバー）を用いる場合にも、コアに少量のリンを加えることにより、1. 547 μm付近でより高い利得を得ることができる。

【0075】

次に、図1の実施の形態の紫外光発生装置における波長変換部20のいくつかの構成例につき説明する。

図3（a）は、2次高調波発生を繰り返して8倍波を得ることができる波長変換部20を示し、この図3（a）において、光ファイバー・バンドル19の出力端19aは、拡大して示されているように例えば128本の光ファイバーをほぼ2mm程度以下の円形に束ねたものである。そして、その各光ファイバー中の直径がほぼ20 μm程度のモード部（コア部）からそれぞれ波長1. 544 μm（周波数を ω とする）のレーザ光が所定の開く角（開口数）を持つ状態で射出され、これらのレーザ光を束ねた光が全体としてレーザ光LB6となっている。

【0076】

そのレーザ光LB6（基本波）は、1段目の非線形光学結晶502に入射し、ここでの2次高調波発生により基本波の2倍の周波数 2ω （波長は1/2の772 nm）の2倍波が発生する。この2倍波は、集光レンズ505を経て2段目の非線形光学結晶503に入射し、ここでも再び2次高調波発生により、入射波の周波数 2ω の2倍、即ち基本波に対し4倍の周波数 4ω （波長は1/4の386 nm）を持つ4倍波が発生する。発生した4倍波は更に集光レンズ506を介して3段目の非線形光学結晶504に進み、ここで再び2次高調波発生によって、入射波の周波数 4ω の2倍、即ち基本波に対し8倍の周波数 8ω を有する8倍波（波長は1/8の193 nm）が発生する。この8倍波は紫外のレーザ光LB5として射出される。即ち、この構成例では、基本波（波長1. 544 μm）→2

倍波（波長772nm）→4倍波（波長386nm）→8倍波（波長193nm）の順に波長変換が行われる。

【0077】

前記波長変換に使用する非線形光学結晶としては、基本波から2倍波への変換を行う非線形光学結晶502には例えばLiB₃O₅（LBO）結晶を、2倍波から4倍波への変換を行う非線形光学結晶503にはGdYCOB、即ちGd_xY_{1-x}Ca₄O_{(BO₃)₃}の結晶（0≤x≤1）を、4倍波から8倍波への変換を行う非線形光学結晶504にはKAB、即ちK₂Al₂B₄O₇の結晶を使用する。

【0078】

この際に、本例のGdYCOBの結晶は、組成を決定するパラメータxの値を調整して、2倍波から4倍波の発生を非臨界位相整合（Non-Critical Phase Matching: NCPM）で行えるような複屈折率を持つ結晶としてある。NCPMは、非線形光学結晶内での基本波（2倍波）と高調波（4倍波）との間の角度ずれである「Walk-off」が起こらないため、高効率で4倍波への変換を可能にし、また発生した4倍波はWalk-offによるビームの変形も受けないため有利である。更に、4倍波から8倍波の発生を行う部分にKABの結晶が使用されているため、高い変換効率が得られる。

【0079】

更に、本例では、非線形光学結晶502, 503, 504の全てにそれぞれ温度制御装置521, 522, 523が装着されている。温度制御装置521～523は、それぞれ加熱素子（ヒータ等）、吸熱素子（ペルティ工素子等）、及び測温素子（サーミスタ等）を備え、不図示の制御部からの制御情報に基づいて非線形光学結晶502, 503, 504の温度をそれぞれ目標温度に維持している。この温度制御によって、波長変換のための位相整合角の最終的な微調整が上記のNCPM（非臨界位相整合）で行われる。このように波長変換部20中の全部の非線形光学結晶502～504について温度制御で位相整合角の微調整を行うことによって、各段で「Walk-off」がより高度に抑制されて、変換効率が高く維持される。

【0080】

なお、変換効率が多少低下しても差し支えない場合には、2段目の非線形光学結晶503をLBO結晶より構成するか、又は3段目の非線形光学結晶504をS BBO ($\text{Sr}_2 \text{Be}_2 \text{B}_2 \text{O}_7$)結晶より構成してもよい。

なお、図3 (a)において、光ファイバー・バンドル19と非線形光学結晶502との間に、レーザ光LB6の入射効率を高めるために集光レンズを設けることが望ましい。この際に、光ファイバー・バンドル19を構成する各光ファイバーのモード径（コア径）は例えば $20 \mu\text{m}$ 程度であり、非線形光学結晶中で変換効率の高い領域の大きさは例えば $200 \mu\text{m}$ 程度であるため、各光ファイバー毎に10倍程度の倍率の微小レンズを設けて、各光ファイバーから射出されるレーザ光を非線形光学結晶50中に集光するようにしてもよい。これは以下の構成例でも同様である。

【0081】

次に、図3 (b) は2次高調波発生と和周波発生とを組み合わせて8倍波を得ることができる波長変換部20Aを示し、この図3 (b)において、光ファイバー・バンドル19の出力端19aから射出された波長 $1.544 \mu\text{m}$ のレーザ光LB6（基本波）は、LBO結晶よりなる1段目の非線形光学結晶507に入射し、ここでの2次高調波発生により2倍波が発生する。更に、非線形光学結晶507中を基本波の一部がそのまま透過する。この基本波及び2倍波は、共に直線偏光状態で波長板（例えば $1/2$ 波長板）508を透過して、基本波のみが偏光方向が90度回転した状態で射出される。この基本波と2倍波とはそれぞれ集光レンズ509を通ってLBO結晶よりなる2段目の非線形光学結晶510に入射する。

【0082】

非線形光学結晶510では、非線形光学結晶507で発生した2倍波と、変換されずに透過した基本波とから和周波発生により3倍波を得る。非線形光学結晶510で得られた3倍波と、波長変換されずに透過した2倍波とは、ダイクロイック・ミラー511により分離されて、ダイクロイック・ミラー511で反射された3倍波は、ミラーM1で反射され集光レンズ513を通って3段目のGdY

C O B 結晶よりなる非線形光学結晶514に入射する。ここで3倍波が2次高調波発生により6倍波（波長257nm）に変換される。非線形光学結晶514も6倍波の発生を非臨界位相整合（N C P M）で行うように、組成を定めるパラメータ χ の値が調整されており、「Walk-off」が殆ど発生しなくなっている。

【0083】

一方、ダイクロイック・ミラーを透過した2倍波は集光レンズ512及びミラーM2を経てダイクロイック・ミラー516に入射し、非線形光学結晶514で得られた6倍波も集光レンズ515を経てダイクロイック・ミラー516に入射し、ここでその2倍波と6倍波とは同軸に合成されて4段目の β -BaB₂O₄（BBO）結晶よりなる非線形光学結晶517に入射する。非線形光学結晶517では、6倍波と2倍波とから和周波発生により8倍波（波長193nm）を得る。

この8倍波は紫外のレーザ光LB5として射出される。なお、4段目の非線形光学結晶517として、BBO結晶の代わりにCsLiB₆O₁₀（CLBO）結晶を用いることも可能である。また、変換効率が或る程度低下しても差し支えない場合には、非線形光学結晶514として、BBO結晶を使用してもよい。この波長変換部20Aでは、基本波（波長1.544μm）→2倍波（波長772nm）→3倍波（波長515nm）→6倍波（波長257nm）→8倍波（波長193nm）の順に波長変換が行われている。

【0084】

また、本例でも全部の非線形光学結晶507, 510, 514, 517にそれぞれ温度を個別の目標温度に維持するための温度制御装置531～534が装着され、温度制御によって位相整合角の微調整が行われている。この際に、例えば非線形光学結晶507と510とでは設定温度が異なっている。

このように6倍波と2倍波との一方が分岐光路を通って4段目の非線形光学結晶517に入射する構成では、6倍波と2倍波とをそれぞれ4段目の非線形光学結晶517に集光して入射させる集光レンズ515, 512を互いに異なる光路に配置することができる。この場合、3段目の非線形光学結晶514で仮に僅かに「Walk-off」が発生し、出力される6倍波の断面形状が長円形になっていても、本例のように、集光レンズ515, 512を別々の光路に配置することにより

、例えば集光レンズ515としてシリンドリカルレンズ対を用いること等が可能となり、6倍波のビーム整形を容易に行うことができる。従って、4段目の非線形光学結晶517での2倍波との重なり部を増加させて、変換効率を高めることが可能である。

【0085】

なお、2段目の非線形光学結晶510と4段目の非線形光学結晶517との間の構成は図3 (b) に限られるものではなく、4段目の非線形光学結晶517に6倍波と2倍波とが同時に入射するように、6倍波と2倍波とでその光路長が等しくなっていれば、いかなる構成であってもよい。更に、例えば2段目の非線形光学結晶510と同一光軸上に3段目及び4段目の非線形光学結晶514, 517を配置し、3段目の非線形光学結晶514で3倍波のみを2次高調波発生により6倍波に変換して、波長変換されない2倍波と共に4段目の非線形光学結晶517に入射させてもよく、これによりダイクロイック・ミラー511, 516を用いる必要がなくなる。

【0086】

次に、図4は2次高調波発生と和周波発生とを組み合わせて8倍波を得ることができる別の波長変換部20Bを示し、この図4において、光ファイバー・バンドル19の出力端19aから射出された波長1.544 μmのレーザ光LB6（基本波）は、1段目の非線形光学結晶（LBO結晶）601に入射し、ここでの2次高調波発生により2倍波が発生すると共に、この中を基本波の一部がそのまま透過する。この場合、不図示の集光レンズによって出力端19aの像（多数の細い光束の像）が非線形光学結晶601の中央部付近に形成されており、その多数の細い光束の像が順次後続の非線形光学結晶中にリレーされている。その基本波及び2倍波は、共に直線偏光状態で波長板（例えば1/2波長板）602を透過して、基本波のみが偏光方向が90度回転した状態で射出される。この基本波と2倍波とはそれぞれ集光レンズ603を通って2段目の非線形光学結晶（LBO結晶）604に入射する。

【0087】

非線形光学結晶604では、入射する2倍波と基本波とから和周波発生により

3倍波を得ると共に、基本波の一部及び2倍波の一部はそのまま透過する。非線形光学結晶604で得られた3倍波と、波長変換されずに透過した基本波及び2倍波とは、ダイクロイック・ミラー605により分離されて、ダイクロイック・ミラー605で反射された3倍波は、2枚のシリンドリカルレンズよりなる非等方的な集光レンズ610及びミラー611を経て出力端19aの像（多数の光束の像）を形成する。この像の形成面の近傍に各光束の像を直交する2方向で異なる倍率に変換するためのシリンドリカルレンズ・アレイ612が配置されている。シリンドリカルレンズ・アレイ612を通過した3倍波は、等方的な集光レンズ613を経てダイクロイック・ミラー614に入射する。

【0088】

一方、ダイクロイック・ミラー605を透過した基本波及び2倍波は集光レンズ606を経て第3の非線形光学結晶（LBO結晶）607に入射し、ここで2倍波は2次高調波発生によって4倍波に変換され、4倍波及びそのまま透過した基本波はダイクロイック・ミラー608で分離される。即ち、ダイクロイック・ミラー608で反射された4倍波は、2枚のシリンドリカルレンズよりなる非等方的な集光レンズ609を経てダイクロイック・ミラー614に入射し、ダイクロイック・ミラー614で同軸に合成された3倍波及び4倍波は4段目の β -B_aB₂O₄（BBO）結晶よりなる非線形光学結晶615に入射して、和周波発生により7倍波を得る。この7倍波は集光レンズ616を経てダイクロイック・ミラー617に入射する。

【0089】

また、ダイクロイック・ミラー608を透過した基本波は、2枚のシリンドリカルレンズよりなる非等方的な集光レンズ618を経て出力端19aの像（多数の光束の像）を形成する。この像の形成面の近傍に各光束の像を直交する2方向で異なる倍率に変換するためのシリンドリカルレンズ・アレイ619が配置されている。シリンドリカルレンズ・アレイ619を通過した基本波は、ミラー620及び等方的な集光レンズ621を経てダイクロイック・ミラー617に入射する。そして、ダイクロイック・ミラー617で同軸に合成された7倍波及び基本波は、LB4、即ちLi₂B₄O₇（四ほう酸リチウム）の結晶よりなる第5の

非線形光学結晶622に入射して、ここでの和周波発生によって8倍波（波長193nm）が得られ、この8倍波が紫外光のレーザ光LB5として射出される。なお、5段目の非線形光学結晶622として、LB4結晶の代わりにKAB、即ち $K_2 Al_2 B_4 O_7$ の結晶を使用することもできる。この波長変換部20Bでは、基本波（波長1.544μm）→2倍波（波長772nm）→3倍波（波長515nm）→4倍波（波長386nm）→7倍波（波長221nm）→8倍波（波長193nm）の順に波長変換が行われている。

【0090】

本例においては、非線形光学結晶607での2倍高調波発生で発生する4倍波、及び非線形光学結晶615での和周波発生で発生する7倍波はそれぞれ「Walk-off」現象によって断面形状が長円形（非等方的）に変形する。但し、本例で入射するレーザ光LB6は、多数（本例では128個）の細くそれぞれ所定の開口を有する光束の集合であり、4倍波及び7倍波を構成する多数の光束の断面形状がそれぞれ個別に非等方的に変形する。従って、図4において、非線形光学結晶607から発生する4倍波660、及び非線形光学結晶604から発した3倍波650の断面形状は、図5に示すように、4倍波660は断面形状が長円形の光束660aの集合であり、3倍波650は断面形状が円形の光束650aの集合である。このため、非線形光学結晶615において単に3倍波650と4倍波660とを重ね合わせて合成波670とすると、この合成波670を構成する各光束670aは重なり部の割合が小さくなつて変換効率が低下する。

【0091】

そこで、本例ではその合成波の重なり部の割合を大きくするために、図4において先ず非等方的な集光レンズ609によって4倍波660を、図6に示すように長手方向に短縮して、個々の光束661aの断面形状がほぼ円形の4倍波661に変換する。なお、4倍波660は非線形光学結晶607中で結像された状態を示し、4倍波661は非線形光学結晶615中で結像された状態を示している。これと並行して、図4において非等方的な集光レンズ610によって3倍波650を、4倍波660と同じ方向に短縮して全体の断面形状を合わせる。この結果、得られる3倍波651は、図6に示すように、全体の断面形状は4倍波66

1と同じであるが、個々の光束651aの形状は長円形となってしまい、光束661aとの重なり部の割合が小さくなる。なお、3倍波650は非線形光学結晶604中で結像された状態を示し、3倍波651は非等方的な集光レンズ610によって結像された状態を示している。

【0092】

その重なり部の割合を大きくするために、図4において、3倍波651の結像面の近傍でシリンドリカルレンズ・アレイ612によって個々の光束の断面形状をほぼ円形に変換している。この結果得られる3倍波652は、図6に示すように、全体の断面形状が4倍波661に合致すると共に、個々の光束652aの断面形状も4倍波661の光束661aに合致する。また、集光レンズ613は等方的であるため、3倍波652は入射時と同じ縦横比で非線形光学結晶615にリレーされる。この結果、非線形光学結晶615では最大の変換効率で7倍波が発生する。

【0093】

更に、非線形光学結晶615から発生する7倍波を構成する多数の光束の断面形状も長円形となる。そこで、最終段の非線形光学結晶622において、7倍波と基本波との全体の断面形状、及び個々の光束の断面形状を合わせるために、非線形光学結晶607を透過する基本波を一度非等方的な集光レンズ618で結像した後、各光束の像をシリンドリカルレンズ・アレイ619によって変形させている。これによって、非線形光学結晶622からは8倍波が最大の変換効率で発生する。

【0094】

また、図4の例では、シリンドリカルレンズ・アレイ612及び619はそれぞれ3倍波（波長515nm）及び基本波（波長1.544μm）の光路上に配置されている。これらのはぼ可視光及び赤外光を透過する光学材料は種類が多いため、そのシリンドリカルレンズ・アレイ612及び619の製造が容易になっている。

【0095】

なお、上記の実施の形態では、交差する2方向で倍率の異なる非等方的光学系

としてシリンドリカルレンズ・アレイ612, 619が使用されているが、その代わりに入射するレーザ光を構成する多数の光束と同じ個数の非等方的なレンズエレメントよりなるマイクロ・レンズ・アレイ、又はそれと同じ個数の微小な回折格子の集合体である回折光学素子、即ちDOE (Diffractive Optical Element)を使用してもよい。

【0096】

また、図3 (a) 及び (b) の波長変換部20, 20A、図4の波長変換部20Bについてそれぞれ各チャネル当たりの8倍波 (波長193nm) の平均出力を見積もってみた所、入射するレーザ光の各チャネル当たりのピーク・パワーを20kW、パルス幅を1ns、パルス繰り返し周波数を100kHz、平均出力を2Wとすると、全128チャネルの合計では何れの波長変換部20, 20A, 20Bであっても露光装置用光源として十分な出力の、波長193nmの紫外光を提供することができる。

なお、波長変換部20, 20A, 20Bと同様の構成によって、基本波 (波長1.544μm) → 2倍波 (波長772nm) → 4倍波 (波長386nm) → 6倍波 (波長257nm) → 8倍波 (波長193nm) の順に波長変換することも可能である。更に、基本波 (波長1.544μm) → 2倍波 (波長772nm) → 3倍波 (波長515nm) → 4倍波 (波長386nm) → 6倍波 (波長257nm) → 7倍波 (波長221nm) → 8倍波 (波長193nm) の順に波長変換することによっても8倍波を得ることができる。これらの中から変換効率が高く、構成が簡素化できるものを使用することが望ましい。

【0097】

次に、F₂ レーザ (波長157nm) とほぼ同一の波長の紫外光を得るために、図1 (a) の単一波長発振レーザ11において発生する基本波の波長を1.57μmとして、波長変換部20として10倍波の発生を行う波長変換部を使用すればよい。そのためには、例えば基本波 (波長1.57μm) → 2倍波 (波長785nm) → 4倍波 (波長392.5nm) → 8倍波 (波長196.25nm) → 10倍波 (波長157nm) の順に波長変換を行えばよい。

【0098】

また、F₂ レーザ（波長157 nm）とほぼ同一波長の紫外光を得るために、図1（a）の単一波長発振レーザ11において発生する基本波の波長を1.099 μmとして、波長変換部20として7倍波の発生を行う波長変換部を使用する方法も考えられる。この場合には例えば基本波（波長1.099 μm）→2倍波（波長549.5 nm）→3倍波（波長366.3 nm）→4倍波（波長274.8 nm）→7倍波（波長157 nm）の順に波長変換を行えばよい。これらの場合にも、必要に応じて図3及び図4の実施の形態と同様の構成を採用することによって高い変換効率を得ることができる。

【0099】

次に、図8は、波長変換部20の別の構成例を示し、この図8において、波長1.544 μmのレーザ光LB6（基本波）は、レンズ701を介して非線形光学結晶（LBO）702に入射し、ここで2倍波が発生し、基本波の一部も透過する。この基本波及び2倍波は、ダイクロイックミラー703で分離されて、基本波はミラー706及びレンズ707を経てダイクロイックミラー708に入射し、2倍波はレンズ704及びミラー705を経てダイクロイックミラー708に入射し、ダイクロイックミラー708で合成された光は非線形光学結晶（LBO）709中で3倍波を発生し、ここを基本波、2倍波、3倍波が通過する。

【0100】

基本波は、ダイクロイックミラー710、711及びミラー712、レンズ720を経てダイクロイックミラー721に向かい、2倍波は、レンズ716を経て非線形光学結晶（LBO、CLBO、BBO、又はLBO等からなる）717で4倍波に変換された後、レンズ718、ダイクロイックミラー715を経て非線形光学結晶（BBO）719に入射する。また、3倍波は、レンズ713、ミラー714、ダイクロイックミラー715を経て非線形光学結晶719に入射し、ここで3倍波と4倍波との和周波発生で7倍波が発生する。この7倍波は、レンズ722を介してダイクロイックミラー721に向かい、ダイクロイックミラー721で合成された基本波及び7倍波が非線形光学結晶（LBO、BBO、CLBO、KAB等）723で8倍波（波長193 nm）に変換される。この8倍波は紫外のレーザ光LB5として射出される。この波長変換部では、基本波（波

長1.544 μm) → 2倍波 → 3倍波 → 4倍波 → 7倍波 → 8倍波 (波長193 nm) の順に波長変換が行われている。

【0101】

本例では、各レンズ701, 704, 707, 713等はそれぞれ1波長の光のみを通過させているため、レンズの色収差が発生しない。従って、変換効率を高めることができる。

次に、図9 (a) は、波長変換部20の更に別の構成例を示し、この図9 (a)において、波長1.544 μmのレーザ光LB6 (基本波) は、レンズ801を介して非線形光学結晶 (LBO) 702に入射し、ここで2倍波が発生し、基本波の一部も透過する。この基本波及び2倍波は、ダイクロイックミラー803で分離されて、基本波はミラー806及びレンズ807を経てダイクロイックミラー808に入射し、2倍波はレンズ804及びミラー805を経てダイクロイックミラー808に入射し、ダイクロイックミラー808で合成された光は非線形光学結晶 (LBO) 809中で3倍波を発生し、ここを基本波、2倍波、3倍波が通過する。

【0102】

基本波は、ダイクロイックミラー810, 813及びミラー814、レンズ815を経てダイクロイックミラー816に向かい、2倍波は、ダイクロイックミラー810、レンズ811、ミラー812、ダイクロイックミラー818を経て非線形光学結晶 (LBO、CLBO、BBO、又はLB4からなる) 819に入射し、3倍波はダイクロイックミラー810, 813、レンズ817、ダイクロイックミラー81を経て非線形光学結晶819に入射し、ここで5倍波が発生し、2倍波はそのまま透過する。そして、2倍波は、ダイクロイックミラー820、レンズ821、ミラー822、ダイクロイックミラー825を経て非線形光学結晶 (CLBO又はBBOよりなる) 826に入射し、5倍波はダイクロイックミラー820、ミラー823、レンズ824、及びダイクロイックミラー825を経て非線形光学結晶826に入射し、ここで2倍波と5倍波との和周波発生で7倍波が発生する。この7倍波は、ミラー827、レンズ828を介してダイクロイックミラー816に向かい、ダイクロイックミラー816で合成された基本

波及び7倍波が非線形光学結晶（LBO, CLBO, KAB等）829で8倍波（波長193nm）に変換される。この8倍波は紫外のレーザ光LB5として射出される。この波長変換部では、基本波（波長1.544μm）→2倍波→3倍波→5倍波→7倍波→8倍波（波長193nm）の順に波長変換が行われている。

【0103】

この結果、7倍波の発生を3倍波と4倍波との和周波発生で行う必要が無いため、7倍波（波長221nm）で吸収のあるBBOを使用する必要が無くなり、耐久性が向上し、かつ位相整合許容誤差が大きくなる。なお、6倍波（258nm）及び5倍波（309nm）では、BBOの吸収は7倍波に比べて十分小さいため、BBOを使用しても耐久性に優れている。また、6倍波よりも5倍波の方がBBOの吸収が少ないため、5倍波発生でBBOを使用することが望ましい。更に、BBOを使用することなく8倍波（193nm）の発生が可能である。

【0104】

また、図9（a）の例でも、各レンズ801, 804, 807, 817等はそれぞれ1波長の光のみを通過させているため、レンズの色収差が発生しない。従って、変換効率を高めることができる。

また、図9（b）の構成例は、基本波（波長1.544μm）→2倍波→3倍波→6倍波→7倍波→8倍波（波長193nm）の順に波長変換が行われており、2倍波発生（ $\omega + \omega \rightarrow 2\omega$ ）の非線形光学結晶832はLBO、3倍波発生（ $\omega + 2\omega \rightarrow 3\omega$ ）の非線形光学結晶839はLBO、6倍波発生（ $3\omega + 3\omega \rightarrow 6\omega$ ）の非線形光学結晶841はBBO、LB4、又はCLBOであり、7倍波発生（ $\omega + 6\omega \rightarrow 7\omega$ ）の非線形光学結晶847はLBO、LB4（BBOも可能）であり、8倍波発生（ $\omega + 7\omega \rightarrow 8\omega$ ）の非線形光学結晶854はLBO, CLBO, KAB等）である。

【0105】

同様に、図10（a）の構成例は、基本波（波長1.544μm）→2倍波→4倍波→5倍波→7倍波→8倍波（波長193nm）の順に波長変換が行われており、2倍波発生（ $\omega + \omega \rightarrow 2\omega$ ）の非線形光学結晶902はLBO、4倍波発

生 ($2\omega + 2\omega \rightarrow 4\omega$) の非線形光学結晶906はLBO又はYCOB、5倍波発生 ($\omega + 4\omega \rightarrow 5\omega$) の非線形光学結晶912はLBO、CLBO、BBO、又はLB4であり、7倍波発生 ($2\omega + 5\omega \rightarrow 7\omega$) の非線形光学結晶921はCLBO (BBOも可能) であり、8倍波発生 ($\omega + 7\omega \rightarrow 8\omega$) の非線形光学結晶854はLBO, CLBO, KAB等) である。

【0106】

同様に、図10 (b) の構成例は、基本波 (波長1.544 μm) → 2倍波 → 4倍波 → 6倍波 → 7倍波 → 8倍波 (波長193 nm) の順に波長変換が行われており、2倍波発生 ($\omega + \omega \rightarrow 2\omega$) の非線形光学結晶932はLBO、4倍波発生 ($2\omega + 2\omega \rightarrow 4\omega$) の非線形光学結晶934はLBO又はYCOB、6倍波発生 ($2\omega + 4\omega \rightarrow 6\omega$) の非線形光学結晶942はCLBO、BBO、又はLB4であり、7倍波発生 ($\omega + 6\omega \rightarrow 7\omega$) の非線形光学結晶947はCBO、LB4 (BBOも可能) であり、8倍波発生 ($\omega + 7\omega \rightarrow 8\omega$) の非線形光学結晶954はLBO, CLBO, KAB等) である。

【0107】

また、図9及び図10の構成例は、何れもレンズの色収差が発生しない。また、7倍波の発生が3倍波と4倍波とを使わずに行われている。

なお、上記の実施の形態では、図1 (a) より分かるようにm組のn個の光増幅ユニット18-1～18-nの出力の合成光を一つの波長変換部20～20Bで波長変換している。しかしながら、その代わりに、例えばm'個 (m'は2以上の整数) の波長変換部を用意し、m組の光増幅ユニット18-1～18-nの出力をn'個ずつm'個のグループに分けて、各グループ毎に1つの波長変換部で波長変換を行い、得られたm'個 (本例では例えばm' = 4又は5等) の紫外光を合成するようにしてもよい。

【0108】

上記の実施の形態の紫外光発生装置によれば、図1 (a) の光ファイバー・バンドル19の出力端の直径が全チャネルを合わせても2mm程度以下であるため、1個、又は数個の波長変換部20ですべてのチャネルの波長変換を行うことが可能である。しかも、出力端が柔軟な光ファイバーを使用しているため、波長変

換部、単一波長発振レーザ、及びスプリッタ等の構成部を分けて配置することが可能となるなど、配置の自由度が極めて高い。従って、本例の紫外光発生装置によれば、安価でコンパクト、かつ単一波長でありながら空間的コヒーレンスの低い紫外レーザ装置が提供できる。

【0109】

次に、図1 (a) の紫外光発生装置を用いた露光装置の一例につき説明する。

図7は、本例の露光装置を示し、この図7において、露光光源171としては、図1 (a) の紫外光発生装置中の単一波長発振レーザ11からm組の光増幅ユニット18-1～18-nまでの部分が使用される。また、その紫外光発生装置は、最終的に出力されるレーザ光LB5の波長が193nm、157nm、又はそれ以外の紫外域にできるように調整されている。

【0110】

図7の露光光源171から射出されたレーザ光（基本波）の大部分は、接続用光ファイバー173を介して露光光として照明系172に供給され、そのレーザ光の残りの部分は接続用光ファイバー178を介してアライメント系（詳細後述）に供給される。光ファイバー173及び178はそれぞれ図1 (a) の光ファイバー・バンドル19を分岐したものに対応している。

【0111】

照明系172は、露光光源171からの基本波を波長変換してレーザ光LB5よりなる紫外域の露光光を出力する波長変換部（図1 (a) の波長変換部20に対応する）、その露光光の照度分布を均一化するオプティカル・インテグレータ（ホモジナイザー）、開口絞り、リレーレンズ、視野絞り（レチクルブラインド）、及びコンデンサレンズ等から構成され、露光時には照明系172から射出された露光光が、マスクとしてのレチクル163のパターン面のスリット状の照明領域を均一な照度分布で照明する。この際に本例の露光光は空間コヒーレンスが低いため、照明系172中の空間コヒーレンスを低下させるための部材の構成を簡素化でき、露光装置を更に小型化できる。

【0112】

レチクル163はレチクルステージ164上に載置されており、レチクル16

3を透過した露光光は投影光学系165を介して、被露光基板としてのウエハ(wafer)166上に照明領域内のパターンの縮小像を倍率 M_{RW} (例えば1/4, 1/5, 1/6等)で投影する。投影光学系165としては、屈折系、反射系、又は反射屈折系が使用できる。但し、露光光が波長200nm程度以下の真空紫外光である場合には高透過率の材料が限定されるため、投影光学系を小型化して、かつ結像性能を高めるために反射屈折系を使用してもよい。ウエハ166にはフォトレジストが塗布されており、ウエハ166は、例えば半導体(シリコン等)又はSOI(silicon on insulator)等の円板状の基板である。

【0113】

ウエハ166は、ウエハステージ167上に保持され、ウエハ166の3次元的な位置は駆動部169によって駆動されるウエハステージ167によって設定される。そして、露光時には、主制御系177の制御のもとで、ウエハステージ167のステップ移動によってウエハ166の位置決めを行った後、照明領域に対してレチクルステージ164を介してレチクル163を所定方向に走査し、ウエハ166をウエハステージ167を介して倍率 M_{RW} を速度比として走査するというステップ・アンド・スキャン方式で、ウエハ166上の各ショット領域にレチクル163のパターンの像が転写される。このように本例の露光装置は走査露光型であるが、露光光源171はステッパー等の一括露光型の露光装置にも適用できることは明きらかである。

【0114】

この場合、本例の露光光源171は、小型であるため、照明系172を支持する架台と一緒に固定しても良い。あるいは露光光源171を単独で架台に固定しても良い。但し、露光光源171に接続される電源などは別置きにしておくことが好ましい。

以上のように、本例の紫外光発生装置を用いた露光装置は従来の他の方式(エキシマレーザやアレイレーザを用いた露光装置)にくらべて小型であり、また、各要素が光ファイバーで接続されて構成されているため、装置を構成する各ユニットの配置の自由度が高い利点がある。

【0115】

ところで、前述の走査露光時における露光量制御では、図1 (a) の光変調素子12によって規定されるパルス繰り返し周波数fと、遅延素子（光ファバー15-1～15-m, 17-1～17-n）によって規定されるチャネル間の遅延時間との少なくとも一方を調整して、走査露光中に露光光源171から複数のパルス光を等時間間隔で発振させるようにしてもよい。更に、フォトレジストの感度特性に応じて、ウエハ166上でのパルス光の強度、ウエハ166の走査速度、パルス光の発振間隔（周波数）、及びウエハ166の走査方向に関するパルス光（即ちその照射領域）の幅の少なくとも1つを調整し、ウエハ上の各点が照射領域を横切る間に照射される複数のパルス光の積算光量を適正露光量に制御する。このとき、スループットを考慮して、ウエハ166の走査速度がウエハステージ167の最高速度にほぼ維持されるように、他の制御パラメータ、即ちパルス光の強度、発振周波数、及び照射領域の幅の少なくとも1つを調整することが好ましい。

【0116】

また、本例においては、接続用光ファイバー173, 178が使用されているため、露光光源171を露光装置本体の外部に設けることも可能である。このような構成とすることにより、光ファイバー増幅器の励起用半導体レーザや半導体レーザのドライブ用電源、温度コントローラ等の発熱を伴う主要な構成部分を露光機本体の外に配設することができる。従って、露光装置本体が露光光源である紫外光発生装置からの発熱の影響を受けて光軸のアライメントがずれる等の熱に起因する問題を抑制することができる。

【0117】

また、本例のレチクルステージ164は駆動機構168によってX方向、Y方向に移動可能で、かつ微小回転可能に構成されている。更に、ウエハステージ167上には基準マーク板FMが設けられており、この基準マーク板FMは後述するベースライン計測などに用いられる。更に本例では、レチクル163上のアライメントマークを検出するアライメント系180と、投影光学系165を介さないオフ・アクシス方式のアライメント系181とが設けられている。

【0118】

本例では露光光源171からのレーザ光（基本波）の一部を分岐して光ファイバー178を介してアライメント系180用の波長変換部179に供給している。波長変換部179としては、図1（a）の波長変換部20と同様で、かつ小型の波長変換部を使用する。波長変換部179はアライメント系180を保持する架台に一体に設けておき、波長変換部179から射出される露光光と同じ波長のレーザ光LB5をアライメント系180の照明光ALとして使用する。

【0119】

これにより、アライメント系180の光源を別途用意する必要がなくなると共に、露光光と同一波長の照明光を用いて基準マーク又はアライメントマークを検出でき、高精度なマーク検出が可能となる。即ち、アライメント系180は、露光光と同一波長域の照明光ALをレチクル163上のアライメントマーク、及び投影光学系165を通して基準マーク板FM上の基準マークに照射すると共に、両マークから発生する光を撮像素子（CCD）で受光してその位置ずれを検出するものであり、レチクル163のアライメントやアライメント系181のベースライン計測などに用いられる。

【0120】

オフ・アクシス方式のアライメント系181は、例えば550～750nm程度の波長幅を持つ白色光（ブロードバンド光）をウェハ166上のアライメントマークに照射すると共に、その内部に設けられる指標マークの像とアライメントマークの像とを撮像素子（CCD）上に結像させて両マークの位置ずれを検出するものである。

【0121】

この場合、アライメント系180、181でそれぞれ基準マーク板FM上の基準マークを検出することで、その検出結果からアライメント系181のベースライン量（検出中心と露光中心との間隔）を計測することができ、この結果及びアライメント系181の計測結果に基づいてウェハ166上の各ショット領域のアライメントが高精度に行われる。なお、ベースライン計測はウェハの露光開始前に行われるが、ウェハを交換するたびにベースライン計測を行ってもよいし、あるいは複数枚のウェハの露光動作に1回程度の割合でベースライン計測を行うよ

うにしてもよい。但し、レチクル交換後には必ずベースライン計測が行われる。

【0122】

なお、前述した実施形態で用いる光ファイバー（光ファイバー増幅器などを含む）はその表面をテフロンで被覆しておくことが好ましい。これは、光ファイバーから発生する異物（纖維などを含む）が露光装置を汚染する物質となり得るため、そのような汚染物質の発生を防止するためである。但し、テフロンで被覆する代わりに、チャンバー内に配置される光ファイバーをまとめてステンレス製の筐体に収納するようにしてもよい。

【0123】

また、上記の実施の形態の投影露光装置は、照明光学系や投影光学系の調整を行うと共に、各構成要素を、電気的、機械的又は光学的に連結して組み上げられる。これらの場合の作業は温度管理が行われたクリーンルーム内で行うことが望ましい。

そして、上記のように露光が行われたウエハが、現像工程、パターン形成工程、ボンディング工程、パッケージング等を経ることによって、半導体素子等のデバイスが製造される。更に、本発明は液晶表示素子やプラズマディスプレイ素子等の表示素子、又は薄膜磁気ディスク等のデバイスを製造する際にも適用することができる。また、投影露光装置用のフォトマスクを製造する際にも本発明を適用することができる。

【0124】

なお、本発明の露光装置中のレーザ装置は、例えばウエハ上に形成された回路パターンの一部（ヒューズなど）を切断するために用いられるレーザリペア装置などにも用いることができる。また、本発明によるレーザ装置は可視光または赤外光を用いる検査装置などにも適用することができる。そしてこの場合には前述の波長変換部をレーザ装置に組み込む必要がない。即ち、本発明は紫外光発生装置だけでなく、可視域または赤外域の基本波を発生する、波長変換部がないレーザ装置に対しても有効なものである。

【0125】

なお、本発明は上述の実施の形態に限定されることなく、本発明の要旨を逸脱

しない範囲で種々の構成を取り得ることは勿論である。

【0126】

【発明の効果】

本発明によれば、光ファイバー増幅器を用いているため、小型化で、かつメンテナンスの容易なレーザ装置を提供することができ、このレーザ装置は露光装置の露光光源や検査用光源等に使用することができる。

また、所定の非線形光学結晶を用いるか、「Walk-off」が生じにくくするか、又は「Walk-off」の影響を軽減するための光学部材を用いることによって、波長変換部における変換効率を高めることができ、露光装置に適用した場合にスループットを向上できる。

【0127】

更に、レーザ光発生部から発生するレーザ光を複数に分岐する光分岐手段を更に備え、光増幅部をその複数に分岐されたレーザ光のそれぞれに独立に設けることによって、出力されるレーザ光を高周波数で変調でき、空間的コヒーレンスを低減できると共に、全体としての発振スペクトル線幅を簡単な構成で狭くできる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の実施の形態の一例の紫外光発生装置を示す図である。

【図2】 図1中の光増幅ユニット18-1～18-nの構成例を示す図である。

【図3】 (a) は図1中の波長変換部20の第1の構成例を示す図、(b) はその波長変換部20の第2の構成例を示す図である。

【図4】 その波長変換部20の第3の構成例を示す図である。

【図5】 図4において、非等方的な集光レンズを使用しない場合の3倍波と4倍波との重なりの状態を示す図である。

【図6】 図4の波長変換部における3倍波と4倍波との重なりの状態を示す図である。

【図7】 本発明の実施の形態の一例の紫外光発生装置を備えた投影露光装置を示す構成図である。

【図8】 本発明の波長変換部20の別の構成例を示す図である。

【図9】 本発明の波長変換部20の更に別の構成例を示す図である。

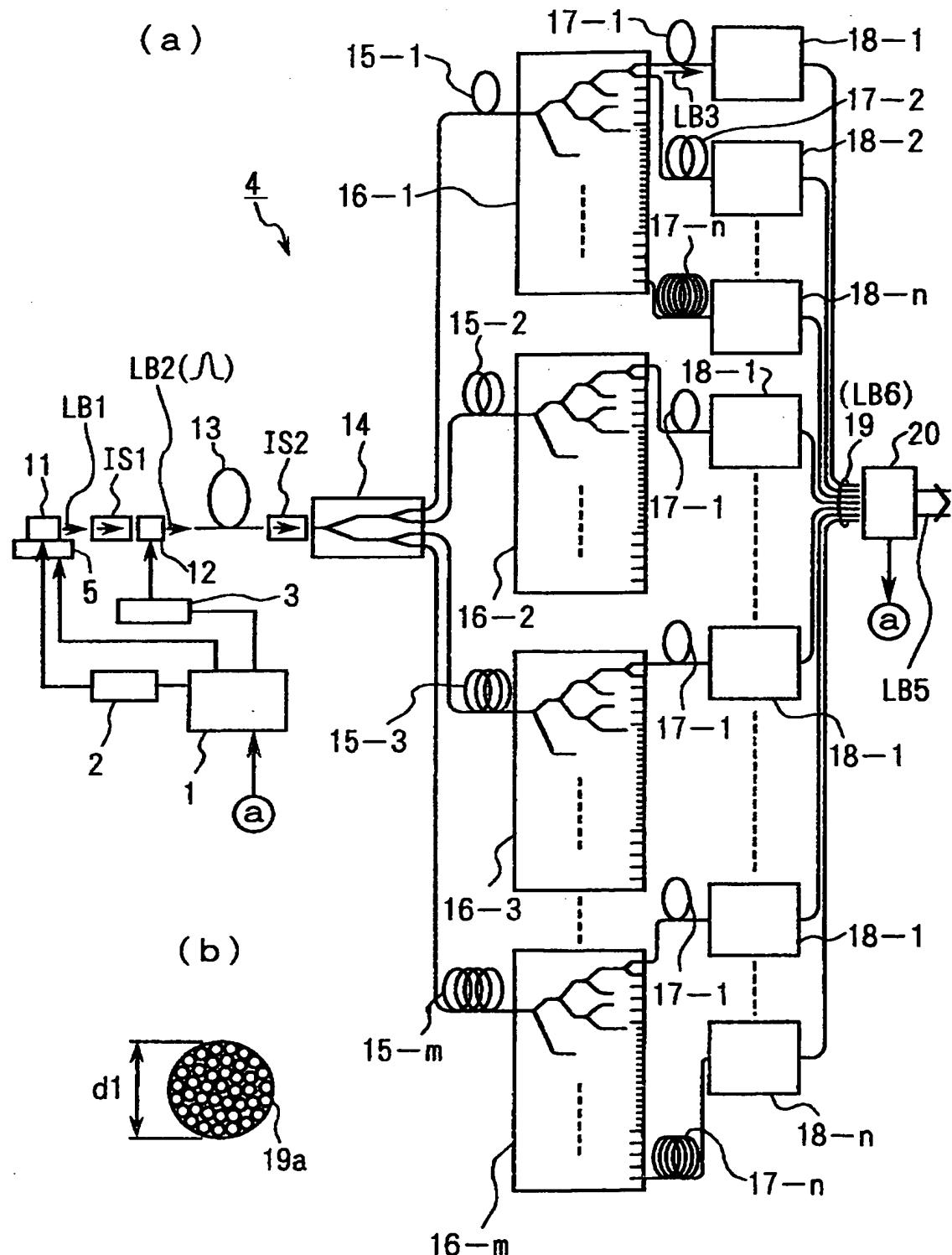
【図10】 本発明の波長変換部20の更に別の構成例を示す図である。

【符号の説明】

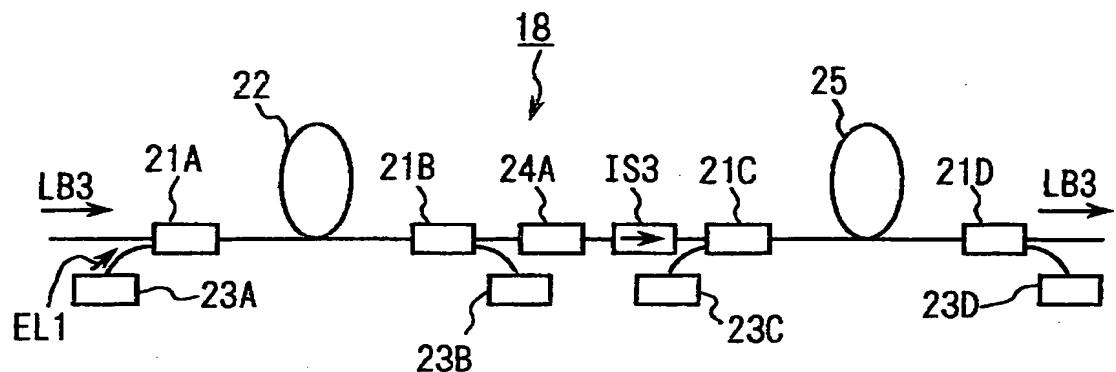
11…単一波長発振レーザ、IS1～IS3…アイソレータ、12…光変調素子、13…光ファイバー増幅器、14…スプリッタ、15-1～15-m、17-1～17-n…光ファイバー（遅延素子）、16-1～16-m…スプリッタ、18-1～18-n…光増幅ユニット、18…光増幅ユニット、19…光ファイバー・バンドル、20, 20A, 20B…波長変換部、22, 25…光ファイバー増幅器、502, 502, 503…非線形光学結晶、521, 522, 523…温度制御装置、609, 610…非等方的な集光レンズ、612, 619…シリンドリカルレンズ・アレイ

【書類名】 図面

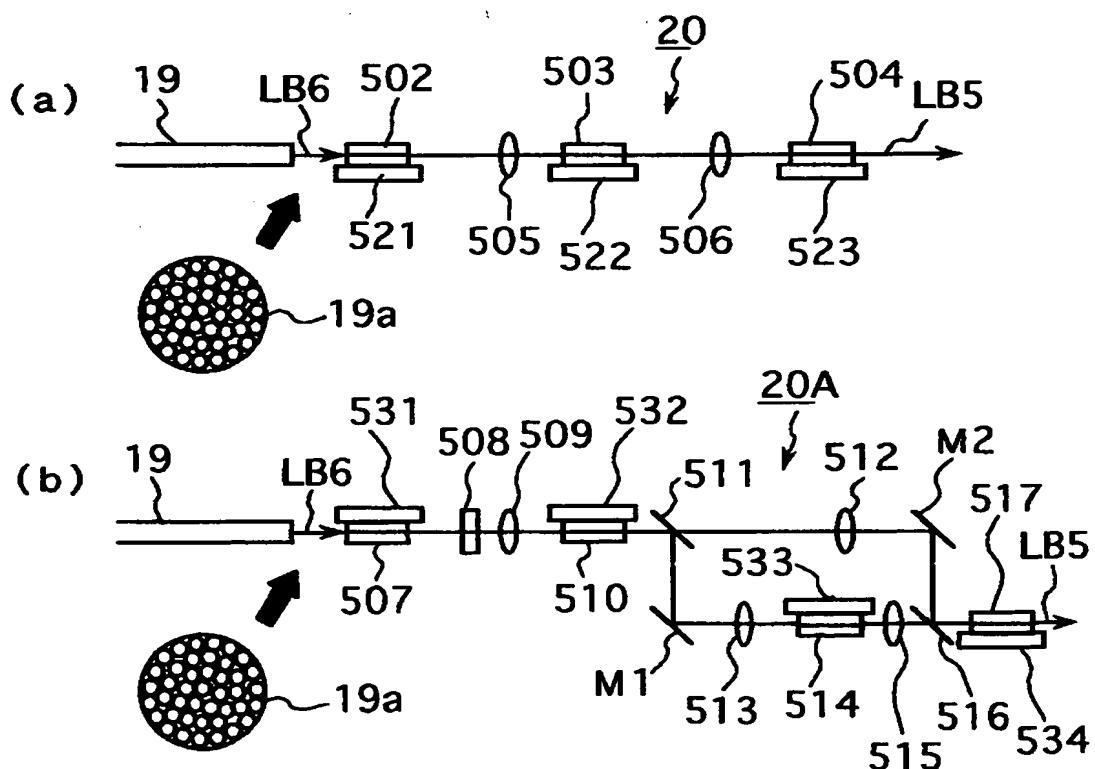
【図1】



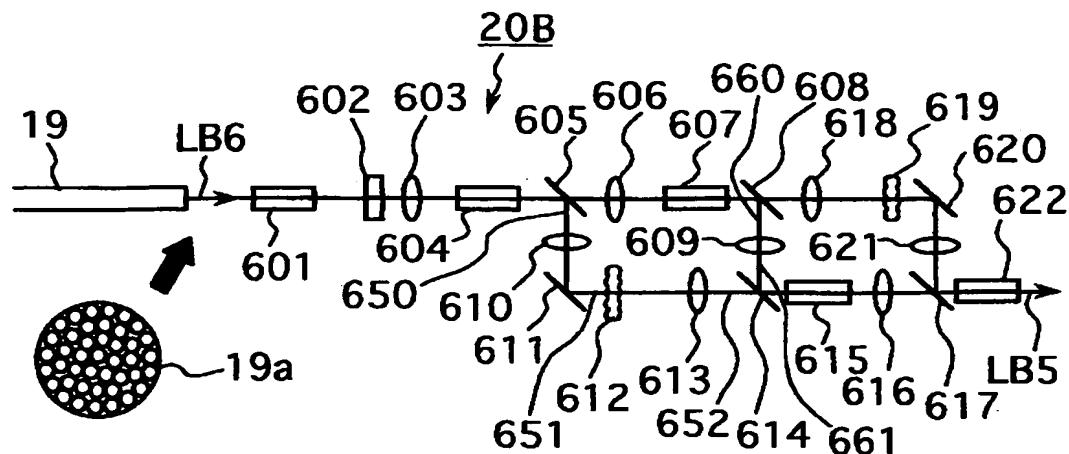
【図2】



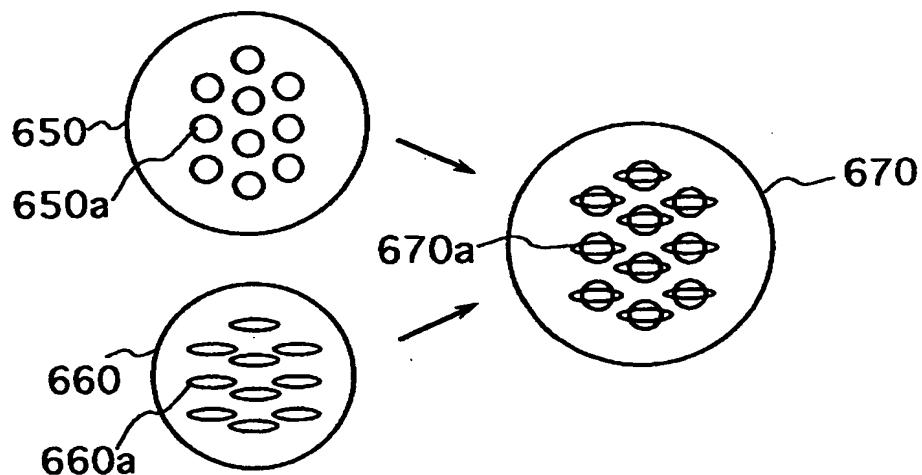
【図3】



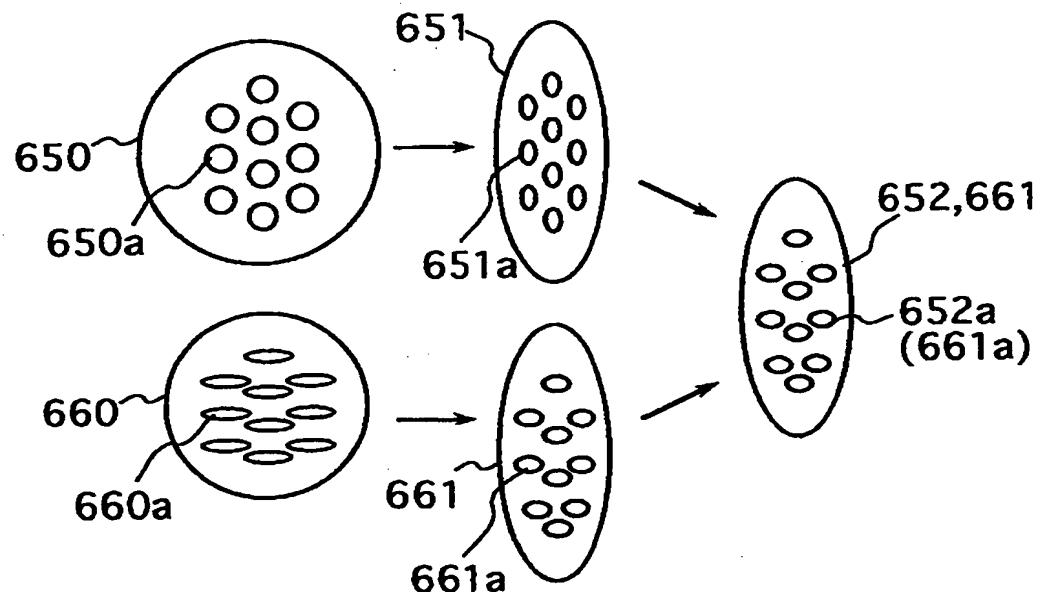
【図4】



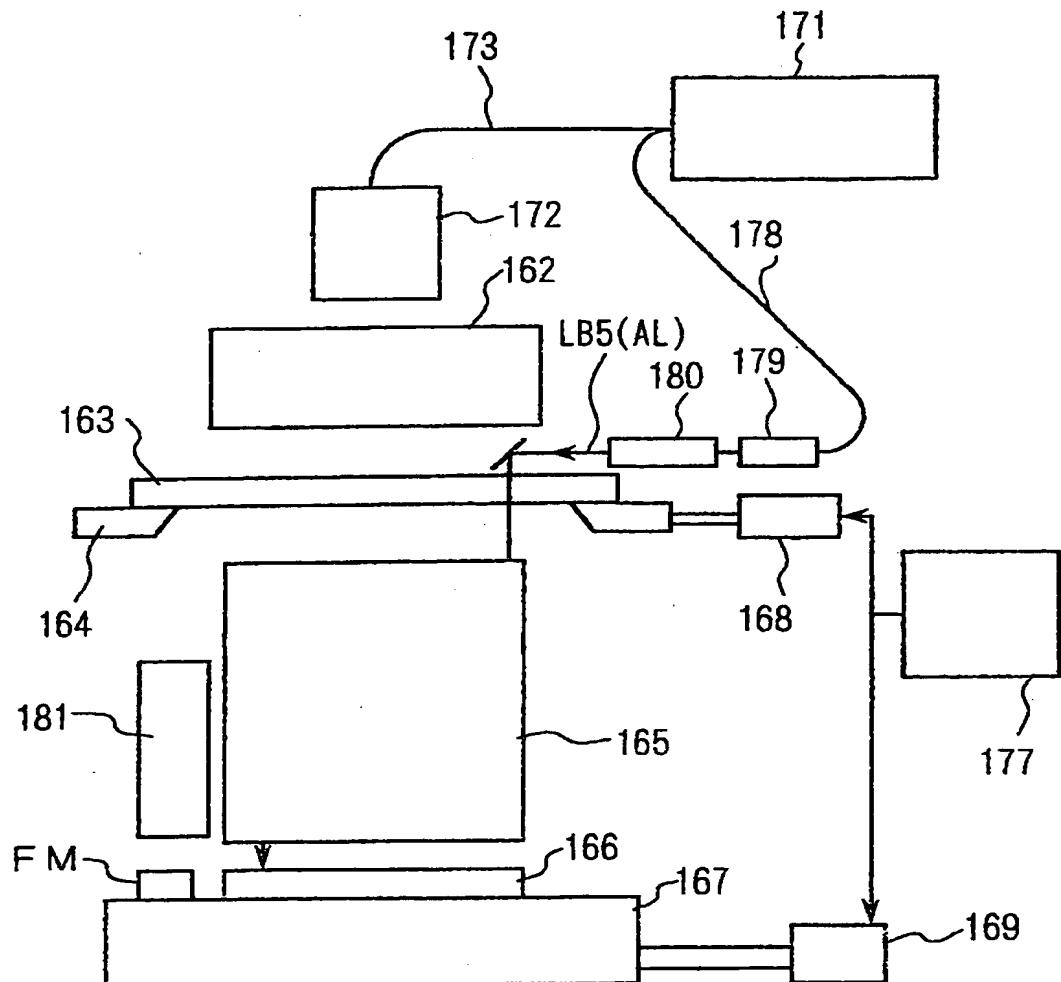
【図5】



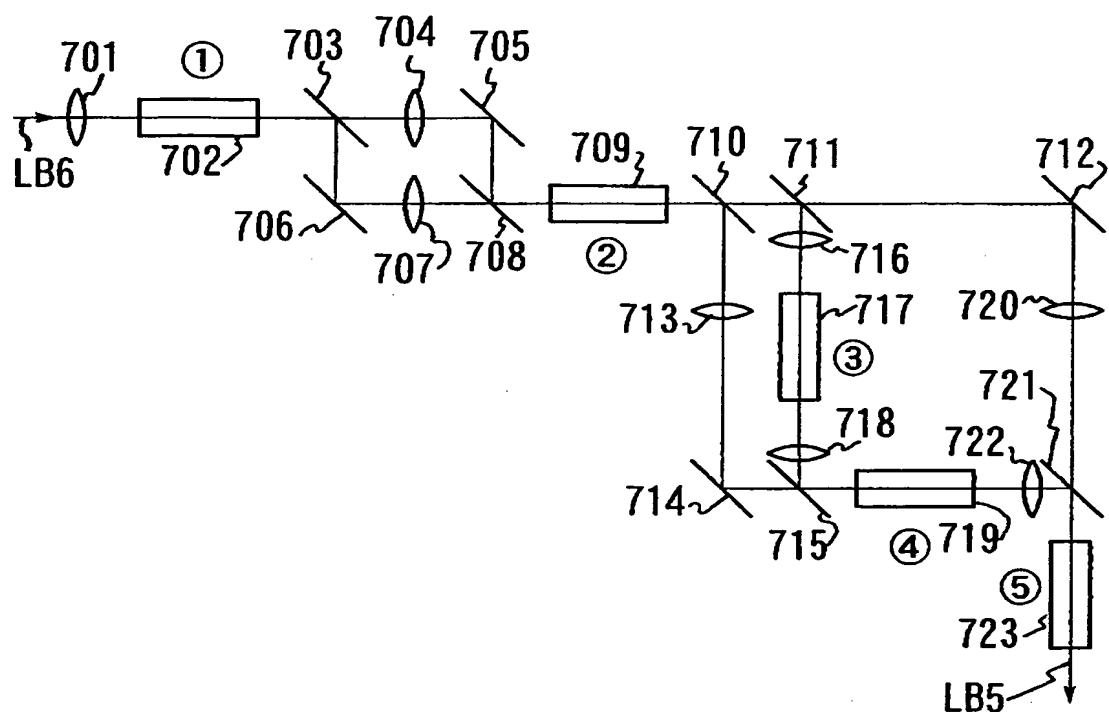
【図6】



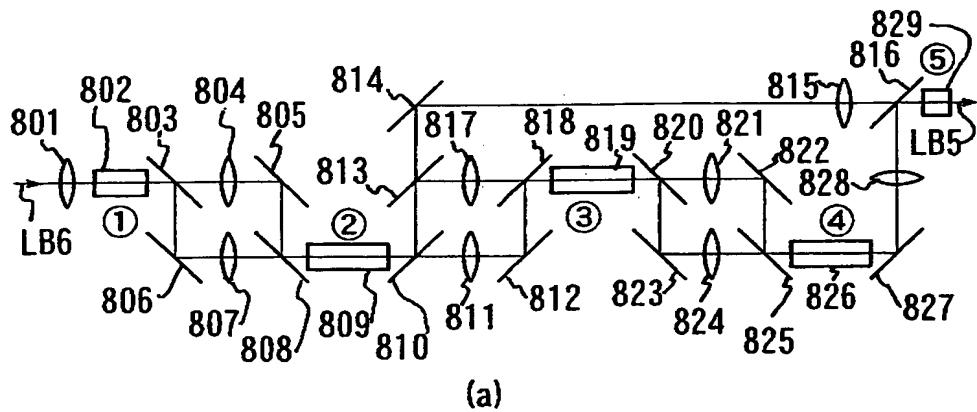
【図7】



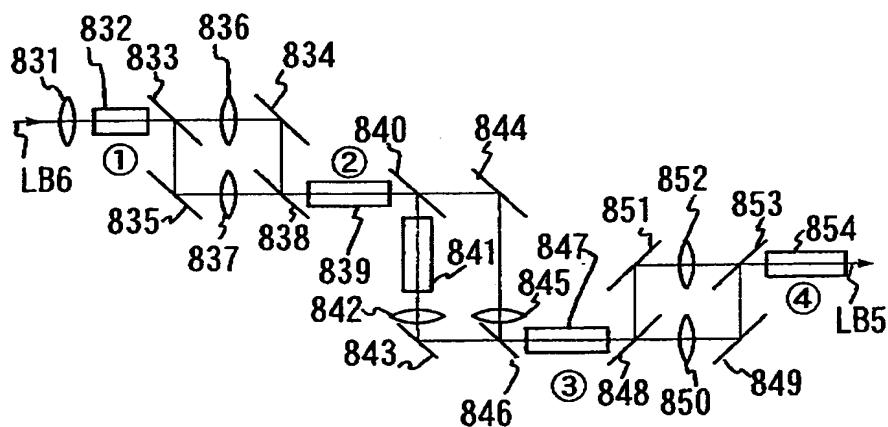
【図8】



【図9】

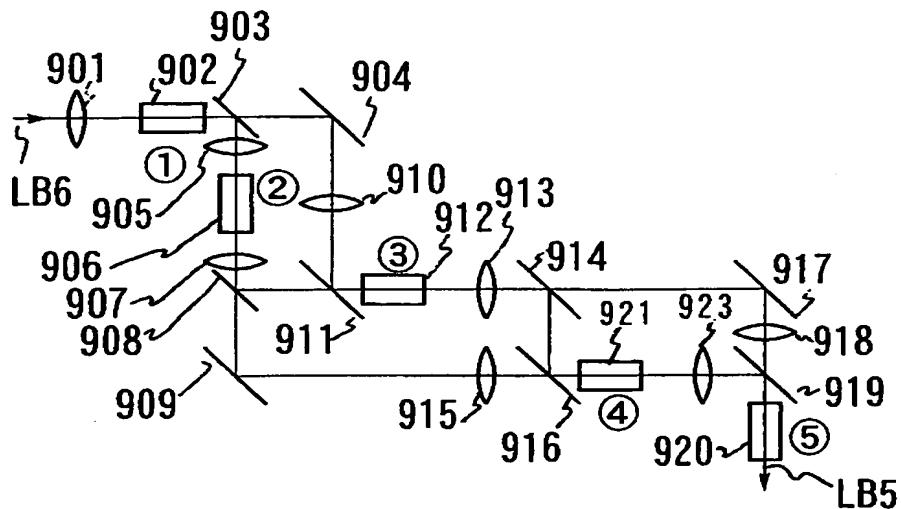


(a)

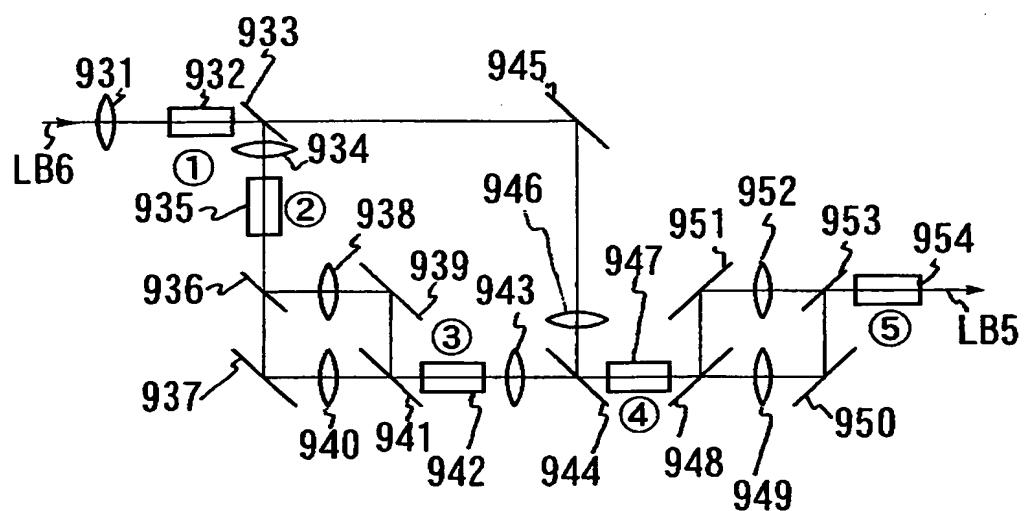


(b)

【図10】



(a)



(b)

【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 露光装置の光源に使用できると共に、装置を小型化でき、かつメンテナンスの容易なレーザ装置を提供する。

【解決手段】 例えばD F B (Distributed feedback) 半導体レーザから射出されて光ファイバー増幅器で増幅されたレーザ光L B 6を、非線形光学結晶5 0 2, 5 0 3, 5 0 4に通して、順次周波数を2倍にして8倍波よりなる紫外域のレーザ光L B 5を発生する。2倍波から4倍波への変換を行う非線形光学結晶5 0 3にはG d Y C O B、即ち $Gd_x Y_{1-x} Ca_4 O (BO_3)_3$ の結晶($0 \leq x \leq 1$)を、4倍波から8倍波への変換を行う非線形光学結晶5 0 4にはK A B、即ち $K_2 Al_2 B_4 O_7$ の結晶を使用する。非線形光学結晶5 0 2～5 0 4の全ての位相整合角の微調整をそれぞれ温度制御装置5 2 1～5 2 3によって行う。

【選択図】 図3

出願人履歴情報

識別番号 [000004112]

1. 変更年月日 1990年 8月29日

[変更理由] 新規登録

住 所 東京都千代田区丸の内3丁目2番3号

氏 名 株式会社ニコン